

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Domagoj Udbinac**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Domagoj Udbinac

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Ivici Garašiću, dr. sc. Maji Jurici i osoblju Laboratorija za zavarivanje na pomoći pri izradi rada.

Domagoj Udbinac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DOMAGOJ UDBINAC**

Mat. br.: **0035188517**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ZAVARIVANJE POCINČANIH LIMOVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WELDING OF ZINC COATED STEELS**

Opis zadatka:

Proučiti primjenu pocinčanih limova u različitim granama industrije te opisati specifičnosti i način nanošenja cinkove prevlake. Analizirati utjecaj prevlake na postupak zavarivanja kao i metalurške te kvalitativne značajke zavara. Dati pregled postupaka prikladnih za zavarivanje pocinčanih limova. Iz literaturnih izvora prikazati nekoliko primjera zavarenih proizvoda i tehnologije zavarivanja pocinčanih limova i profila.

U eksperimentalnom dijelu na pocinčanim limovima male debljine odabrati prikladan postupak zavarivanja i odgovarajući dodatni materijal. Definirati parametre zavarivanja i na zavarenim uzorcima ocijeniti utjecaj parametara na kvalitetu zavara kao i površinu pocinčanog sloja. Izdvojiti kritične parametre i ustanoviti optimalni raspon koji kompenzira negativni utjecaj cinkove prevlake. U konačnici dati smjernice za razvoj zaštitnih plinova i dodatnih materijala za zavarivanje pocinčanih limova.


Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.


Rok predaje rada:  
**1. rok:** 26. veljače 2015.  
**2. rok:** 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
**2. rok:** 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

  
Doc. dr. sc. Ivica Garašić

  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS SLIKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
1. UVOD.....	1
2. POCINČANI LIMOVI .....	2
2.1. Priprema površine metala.....	2
2.1.1. Mehanička obrada .....	3
2.1.2. Kemijska obrada .....	3
2.1.3. Elektrokemijska obrada .....	4
2.1.4. Odmašćivanje.....	4
2.2. Postupci pocinčavanja.....	5
2.2.1. Vruće uranjanje .....	5
2.2.2. Elektrokemijsko nanošenje cinka .....	7
2.2.3. Kemijsko nanošenje cinka .....	7
2.2.4. Šeradiranje (difuzijsko pocinčavanje).....	8
2.2.5. Raspršivanje cinka .....	8
2.3. Primjena pocinčanih limova.....	9
3. ZAVARIVANJE POCINČANIH LIMOVA.....	11
3.1. Cinkove pare .....	11
3.2. Sigurnost pri zavarivanju .....	11
3.3. Svojstva zavara .....	12
3.4. Zaštita od plinova nastalih prilikom zavarivanja pocinčanih limova .....	13
3.5. Obnavljanje otpornosti na koroziju.....	13
3.6. Nastajanje pora i/ili pukotina u zavaru .....	13
3.7. Zavarivanje prije pocinčavanja .....	14
3.8. Zavarivanje laserom.....	15
3.8.1. Metode zavarivanja laserom .....	16
3.9. MIG/MAG zavarivanje .....	19
3.9.1. Postupak zavarivanja .....	21
3.9.2. Zaštitni plinovi .....	22
3.9.3. Parametri zavarivanja.....	22
3.10. Lemljenje .....	23
3.10.1. MIG lemljenje .....	25
3.10.1.1. Zaštitni plinovi .....	26
3.11. Elektrootporno točkasto zavarivanje.....	27
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	30
4.1. Opis eksperimenta.....	30
4.2. Postupak zavarivanja.....	30
4.3. Oprema.....	31
4.4. Tehnološki i tehnički podaci o radnim komadima i postupku zavarivanja.....	33

---

5. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	44

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Metode nanošenja cinka [2] .....	5
Tablica 2. Metode zavarivanja pocinčanih limova laserom [8] .....	16
Tablica 3. Najčešće korištene mješavine zaštitnih plinova [16] .....	26
Tablica 4. Debljine limova korištenih u eksperimentu.....	33
Tablica 5. Početni parametri.....	34
Tablica 6. Parametri lemljenja limovimova sa slojem debljine cinka između 5 $\mu\text{m}$ i 8 $\mu\text{m}$ – Uzorak 1 .....	36
Tablica 7. Parametri lemljenja limovimova sa slojem debljine cinka između 10 $\mu\text{m}$ i 15 $\mu\text{m}$ – Uzorak 2 .....	38
Tablica 8. Parametri lemljenja limovimova sa slojem debljine cinka između 15 $\mu\text{m}$ i 20 $\mu\text{m}$ – Uzorak 3 .....	39

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Presjek cinkove prevlake izvedene postupkom vrućeg pocinčavanja [2] .....	6
Slika 2.	Mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija [2] .....	7
Slika 3.	Prevlaka cinka dobivena metalizacijom [2] .....	8
Slika 4.	Most Menai Straits [5] .....	9
Slika 5.	Metode za poboljšavanje odvođenja plinova nastalih pri zavarivanju [6] .....	12
Slika 6.	Pora u zavaru [7] .....	14
Slika 7.	(a) Shematski prikaz laserskog zavarivanja pocinčanih limova (b) Prikaz zavora s greškama [8] .....	16
Slika 8.	Oprema korištena u eksperimentu [8] .....	18
Slika 9.	Prikaz uzorka u dvije projekcije [8] .....	19
Slika 10.	Oprema za zavarivanje s označenim dijelovima [8] .....	20
Slika 11.	Unutrašnjost dodavača žice [10] .....	21
Slika 12.	Primjer zavora na pocinčanoj ogradi [11] .....	23
Slika 13.	Sile na granicama medija [18] .....	24
Slika 14.	Shema zalemljenog spoja [17] .....	25
Slika 15.	Shema točkastog elektrotopnog zavarivanja [12] .....	28
Slika 16.	Kapice za elektrode za EO točkasto zavarivanje [13] .....	29
Slika 17.	Postupak EO točkastog zavarivanja pocinčanih limova [14] .....	29
Slika 18.	Preklopni spoj .....	30
Slika 19.	Uređaj korišten za MIG tvrdo lemljenje - Welbee P500L .....	31
Slika 20.	Sustav za dobavu žice .....	32
Slika 21.	Automat za vođenje pištolja – BUG-O Systems .....	32
Slika 22.	Pripremljeni limovi za lemljenje .....	34
Slika 23.	Upravljačka ploča s unijetim parametrima .....	35
Slika 24.	Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje zavarivanja [15] .....	36
Slika 25.	Uzorak 1 - lice .....	37
Slika 26.	Uzorak 1 - naličje .....	37
Slika 27.	Uzorak 2 - lice .....	38
Slika 28.	Uzorak 2 - naličje .....	39
Slika 29.	Uzorak 3 - lice .....	40
Slika 30.	Uzorak 3 - naličje .....	40



---

**SAŽETAK**

Završni rad podijeljen je na dva dijela, teorijski i eksperimentalni.

U teorijskom dijelu dan je kratki opis svojstava cinka kao tehničkog materijala, kao i prednosti zaštite od korozije pocinčavanjem. Također, nabrojani su najčešći postupci pocinčavanja i ukratko su opisani. Uz sve to ukratko je opisana procedura pripreme materijala za pocinčavanje. Navedena su područja primjene pocinčanih obradaka i neki primjeri iz prakse. Govori se o zavarivanju pocinčanih limova u smislu zaštite na radu, kvaliteti zavarenog spoja, zavarivanju poslije pocinčavanja, obnavljanju korozijske postojanosti itd. Navedeno je nekoliko postupaka koji se koriste pri zavarivanju pocinčanih obradaka.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je istraživanje o utjecaju parametara na kvalitetu lema pocinčanih limova različite debljine zaštitnog sloja cinka. Idealni parametri su određeni na limovima s najtanjim slojem cinka. S tim parametrima izvedeni su lemovi na lomovima s debljim slojem cinka i izvršena je usporedba rezultata.

Ključne riječi: *pocinčavanje, primjena, postupci, priprema obradaka*

## 1. UVOD

Cink je meki metal niske čvrstoće koji slobodno korodira, ali sporo i relativno konstantnom brzinom. Cink je, također, dosta otporan na maziva i goriva u kojima ima spojeva dvovalentnog sumpora. Cinkove prevlake debljine 25  $\mu\text{m}$  štite čelik od hrđanja 10 do 30 godina u seoskoj, 8 do 16 godina u primorskoj i 4 do 6 godina u industrijskoj atmosferi. Razlog male brzine korozije je tendencija stvaranja cinkovih klorida i karbonata kao korozijskih produkata, koji guše napredovanje korozije.

Karakteristike relativne inertnosti prema atmosferskim uvjetima i dovoljna reaktivnost pri zaštiti čelika čine ga jedinstvenim. Njegove prednosti su još njegova laka dostupnost i činjenica da je jedan od najjeftinijih obojenih metala.

Iako se i ostali metali mogu koristiti, kao prevlake na čelicima kao što su magnezij, aluminij i kalcij, nijedan se nije pokazao dovoljno koristan i efektivan kao cink. U SAD-u se godišnje iskoristi preko milijun tona cinka, a otprilike pola toga iznosa se iskoristi kao prevlake za zaštitu čelika. Većina toga se koristi za galvanizaciju i elektrodepoziciju cinčanih prevlaka. U SAD-u se svake godine približno deset milijuna tona čelika zaštiti nekom vrstom cinčane prevlake [1]. Zbog relativno konstantne brzine korozije životni vijek cinkovih prevlaka je proporcionalan njihovoj debljini. Debljina sloja je ovisna o metodi nanošenja.

## 2. POCINČANI LIMOVI

Više od stoljeća cink se koristi kao prevlaka za zaštitu čelika. Prevlačenje cinkom predstavlja najefektivniji i najekonomičniji način antikorozijske zaštite čelika.

Pocinčani čelici nude kombinaciju sljedećih svojstava: [1]

- Visoke čvrstoće,
- Oblikovljivosti,
- Male težine,
- Korozijske otpornosti,
- Estetike,
- Niske cijene.

Navedeno se ne može postići jednako kvalitetno niti s jednim drugim materijalom. Zbog ovih razloga, pocinčani čelik je idealan materijal u graditeljstvu i raznim proizvodnim primjenama, od automobilske industrije do uređaja u domaćinstvu. Također, primjenjuje se u velikim količinama u graditeljstvu, kao što je već i spomenuto, i u gradnji čamaca u kojoj je najzastupljenija metoda spajanja upravo zavarivanje.

Korozija košta razvijene industrijske zemlje oko 4% godišnjeg BDP-a svake godine, što nije mali iznos. Znajući tu činjenicu i prednosti koje donosi pocinčavanje, primjena pocinčanih proizvoda značajno je u porastu u posljednjih petnaest godina. Prema podacima iz 2000-te postoji preko 550 linija za kontinuirano pocinčavanje diljem svijeta, a očekuje se i porast tog broja. [2]

Lim za pocinčavanje je lim od običnog ugljičnog čelika, a to znači da je vrlo osjetljiv na koroziju. On se prevlači tankim slojem cinka, koji mu daje odličnu otpornost na koroziju. Pocinčavanjem se dobiva lim koji ima veliku čvrstoću i žilavost, nisku cijenu, te dobru otpornost na korozijsko djelovanje okoline.

### 2.1. Priprema površine metala

Preduvjet za kvalitetno prevlačenje metalnog predmeta je dobra priprema njegove površine. Prije svake zaštite potrebno je s površine ukloniti nečistoće kao što su produkti korozije, okujinu, masnoće i dr. [2]. Nečistoće se uklanjaju postupcima čiji karakter i redoslijed ovise o stupnju onečišćenja, vrsti prevlake i željenom izgledu proizvoda.

Postupci za pripremu površine su:

- Mehanički,
- Kemijski,
- Elektrokemijski,
- Odmašćivanje.

### **2.1.1. Mehanička obrada**

Ovom vrstom obrade se skidaju korozijski produkti, a primjenjuje se nekoliko tipova postupaka [3]:

- Brušenje – može biti grubo i fino, a provodi se čvrstim ili elastičnim kolutovima s abrazivom ili neprekidnom trakom s abrazivom,
- Poliranje – izvodi se pastom ili prahom za poliranje i koristi se za uklanjanje zaostalih neravnina nakon brušenja,
- Obrada u bubnjevima – provodi se za sitne predmete koji nisu osjetljivi na udarce uz rotiranje s abrazivom (kvarcni pijesak, korund),
- Četkanje – vrši se skidanje rahlih korozijskih produkata s površine metala četkama od metalne žice ili perlona. Pri strojnoj obradi se koriste rotirajuće četke,
- Pjeskarenje – služi za uklanjanje korozijskih produkata, te stare metalne ili nemetalne prevlake, i to u struji kvarcnog pijeska ili korunda s komprimiranim zrakom. Korund je puno bolje rješenje jer ne stvara za zdravlje opasnu silikatnu prašinu koja izaziva teške bolesti dišnih organa (silikoza),
- Mlaz vode s dodacima pijeska – služi za mehaničko uklanjanje nečistoća i smanjuje prašinu u zraku,
- Sačmarenje – provodi se mlazom čelične sačme pomoću specijalnih mlaznica, postupak je vrlo sličan pjeskarenju.

### **2.1.2. Kemijska obrada**

Kemijska obrada u otopinama kiselina ili lužina (dekapiranje) služi za uklanjanje korozijskih produkata i anorganskih onečišćenja s površine metala. Pri korištenju ovog tipa obrade uvijek postoje određeni zahtjevi kao što su brzo otapanje korozijskih produkata, niska cijena, neotrovnost, mogućnost regeneriranja, neisparljivost i što manje otapanja metala koje se sprječava dodatkom inhibitora. Kiselinsko dekapiranje se najčešće izvodi u otopinama

klorovodične ili sumporne kiseline za čelike, dok dušične kiseline koristimo za bakar. Lužnato dekapiranje najčešće se izvodi u otopinama natrijevog hidroksida.

### **2.1.3. Elektrokemijska obrada**

Elektrokemijska obrada sadrži dva tipa obrade, a to su elektrokemijsko nagrivanje i elektrokemijsko poliranje.

Pomoću elektrokemijskog nagrivanja uklanjaju se oksidi i drugi produkti korozije s površine metala, uronjenog u elektrolit, istosmjernom strujom. Može biti anodno ili katodno. Kod anodnog nagrivanja metal je spojen kao anoda i postižu se vrlo dobri rezultati kod predmeta koji nemaju veće izbočine ili udubljenja zbog ravnomjernije podjele gustoće struje. Kod katodnog nagrivanja metal je spojen kao katoda i nalazi se u otopini kiseline, te se na njemu razvija vodik koji mehanički odstranjuje okside s površine metala. Kod ovog tipa nagrivanja nema bojazni od otapanja metala, ali postoji opasnost od vodikove krhkosti koja se može spriječiti kombiniranjem anodnog i katodnog nagrivanja.

Elektrokemijsko poliranje je postupak u kojem ne dolazi do promjene metalne strukture zbog topline oslobođene trenjem (za razliku od mehaničkog poliranja). Dijelovi koji moraju biti podvrgnuti elektropoliranju su spojeni kao anode u elektrolitu određenog sastava i koncentracije.

### **2.1.4. Odmašćivanje**

Odmašćivanje je postupak koji služi za odstranjivanje mineralnih i bioloških masnih tvari, tj. teških ugljikovodika iz nafte, odnosno triglicerida masnih kiselina iz biljki, životinja ili ljudi s površine metala i neophodno je kod pripreme površine za nanošenje prevlaka kako bi prevlaka što bolje prianjala na metalnu površinu. Postoje četiri vrste postupka: pomoću lužnatih otopina, pomoću organskih otapala, elektrokemijsko odmašćivanje i odmašćivanje ultrazvukom [3].

## 2.2. Postupci pocinčavanja

Postoji nekoliko metoda nanošenja cinka na čelične površine, a one su prikazane u tablici 1.

**Tablica 1. Metode nanošenja cinka [2]**

	Metode nanošenja cinka na metalnu površinu
1.	Vruće uranjanje <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Vruće uranjanje poslije obrade</li> <li>➤ Kontinuirano linijsko</li> </ul>
2.	Elektrokemijsko nanošenje cinka
3.	Kemijsko nanošenje cinka
4.	Šeradiranje
5.	Naštrcavanje

Debljina nanesenog sloja cinka ovisi od postupka do postupka, kreće se od nekoliko mikrometara pa do nekoliko desetaka mikrometra (6...100  $\mu\text{m}$ ) a moguće su i veće debljine slojeva.

U sljedećim ulomcima detaljnije će se objasniti metode nanošenja cinka na metalnu površinu.

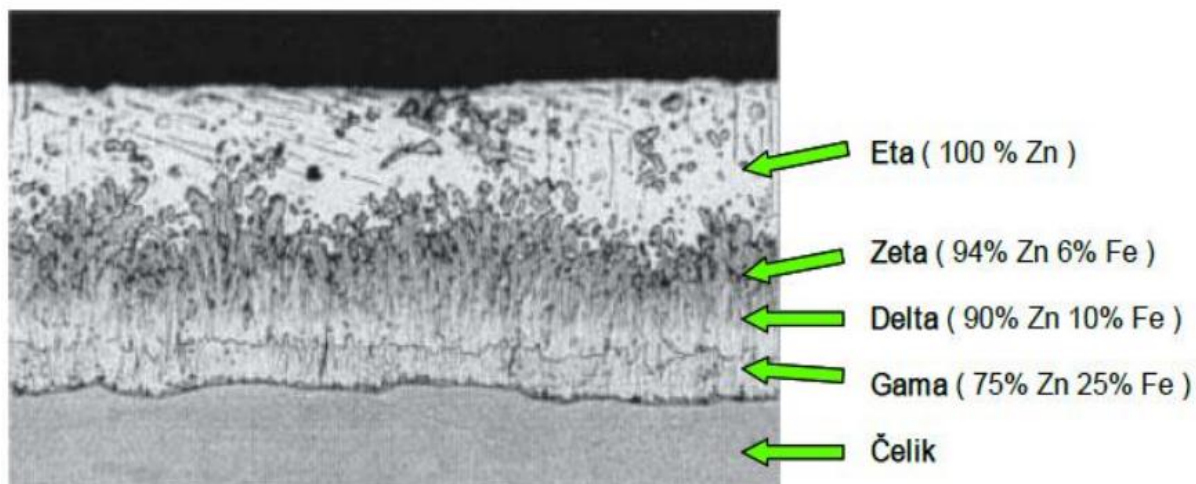
### 2.2.1. Vruće uranjanje

Vruće uranjanje je glavni proces nanošenja cinka na čelik. Vruće uranjanje je proces u kojem se prvo očisti površina čelika od svih nečistoća i okujina i zatim se uranja u rastaljeni cink. Rastaljeni cink brzo vlaži očišćeni čelik i spaja se s njime tvoreći čvrstu vezu između cinka i površine čelika. Jedna od najvećih prednosti ovog postupka je taj da kad je objekt uronjen, izvučen, i ohlađen, proces je gotov i s galvaniziranim predmetom se može rukovati bez straha od oštećenja. Prevlake dobivene vrućim uranjanjem su hrapave i omogućuju neprobojnu i dugotrajnu barijeru protiv većine atmosferskih korozijskih procesa.

#### Vruće uranjanje poslije obrade

To je jedna od prvih metoda koja se koristila za prevlačenje cinkom. Vrlo je učinkovita i kontinuirano se koristi već godinama s malim poboljšanjima. Taj proces ima vrlo širok raspon primjene od najsitnijih dijelova kao što su vijci i matice pa sve do velikih kao što su spremnici, kontejneri itd.

Na slici 1 dan je presjek mikrostrukture pocinčane čelične površine. Iz slike se može vidjeti da se prevlaka cinka sastoji od  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\zeta$  i  $\eta$ -faza.  $\gamma$ - gama faza sadrži 75% Zn i 25% Fe,  $\delta$ - delta faza sadrži 90% Zn i 10% Fe,  $\zeta$ - zeta faza sadrži 94% Zn i 6% Fe dok  $\eta$ - eta faza sadrži 100% Zn. Ne postoji linija koja razgraničava željezo od cinka, nego stupnjeviti prijelaz od čistog željeza do čistog cinka i to osigurava čvrstu vezu između ta dva materijala.



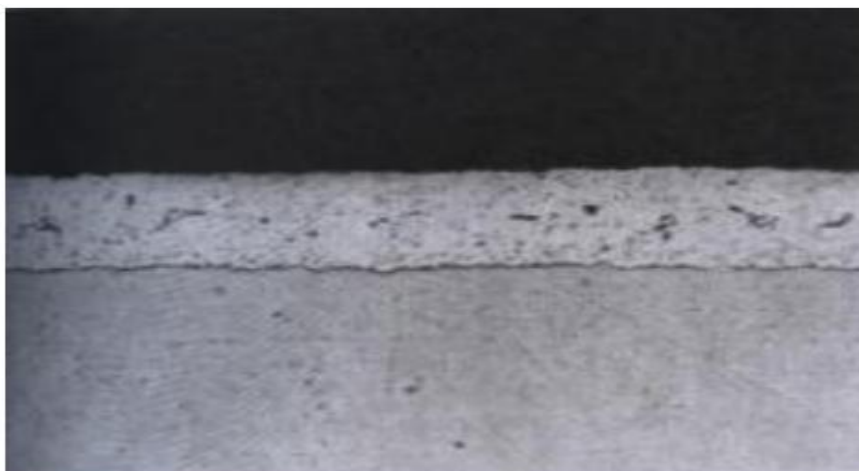
**Slika 1.** Presjek cinkove prevlake izvedene postupkom vrućeg pocinčavanja [2]

Struktura prevlake od cinka i njegova debljina ovisi o sastavu i fizikalnim uvjetima u kojima je čelik bio obrađen baš kao i temperatura te vrijeme obrade u kupki. Ukupna debljina legirnog sloja ima tendenciju da bude nešto veća na rubovima. Debljina prevlake se može kontrolirati tako da se kontrolira vrijeme uranjanja i brzina vađenja. Kada se zahtjeva tanka prevlaka, cink se mehanički makne s površine. Mali dijelovi i dijelovi sa navojem su često centrifugirani nakon što su bili vruće umočeni u cilju da bi se uklonio višak cinka. Jedan od nedostataka galvanizacije vrućim uranjanjem je mogućnost deformacije strukture tijekom zagrijavanja u kupci. Sve u svemu, ovo je vrlo koristan proces, posebice za komplicirane i razmjerno lagane predmete.

### Kontinuirano linijsko uranjanje

Vrlo male količine aluminija dodaju su u cinčanu kupku što omogućava dobru adheziju i dovoljnu duktilnost da je moguće duboko vučenje i savijanje bez značajnijeg oštećenja same prevlake. Većina vruće uronjenih čelika koji se koriste u izradi metalnih građevina su izrađeni metodom neprekinutih traka. Prevlake od cinka dobivene ovim procesom se razlikuju od prevlaka dobivenih vrućim uranjanjem u tome što se u ovom procesu ostvaruje legiranje između čelika i cinka.

Slika 2 prikazuje mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija dobivenih galvaniziranjem, gdje se jasno vide granice između dva metala.



**Slika 2. Mikrografski prikaz kontinuiranih trakastih linija [2]**

### **2.2.2. Elektrokemijsko nanošenje cinka**

Elektrokemijsko nanošenje cinka je bitno hladniji proces uspoređujući s toplinom koja se javlja kod vrućeg uranjanja. Većina ovih procesa su neprekidna i primjenjuju se na limove, žice, te električne kablove i slične objekte. Dobiva se tanki sloj čistog cinka koji ima odlična prijanjajuća svojstva. Prevlaka je glatka, bez sjajnih karakteristika. Prevlake na limu obično imaju težinu od otprilike 19 do 62 grama po kvadratnom metru. Elektrodepozicijski čelik omogućava proces primjene cinčanih prevlaka na dijelove koji ne mogu biti vruće uranjani. To je posebno korisno kod onih dijelova koji mogu biti oštećeni pri povišenim temperaturama.

### **2.2.3. Kemijsko nanošenje cinka**

Kemijsko nanošenje cinka je postupak sličan elektrokemijskom nanošenju, iako nije kontinuiran i primjenjuje se kao šaržni postupak. U njemu se debljina cinka može kontrolirati tako da se vodi računa koliko je dugo predmet uronjen u kupci. Ovo je vrlo efektivna metoda nanošenja cinka na male predmete. Najčešće se koristi za predmete manjih dimenzija koji se prevrću u bubnju koji se nalazi u kupci. Kemijski cinčane prevlake su tamno sive boje. Prevlaka je od čistog cinka i homogenog je sastava.



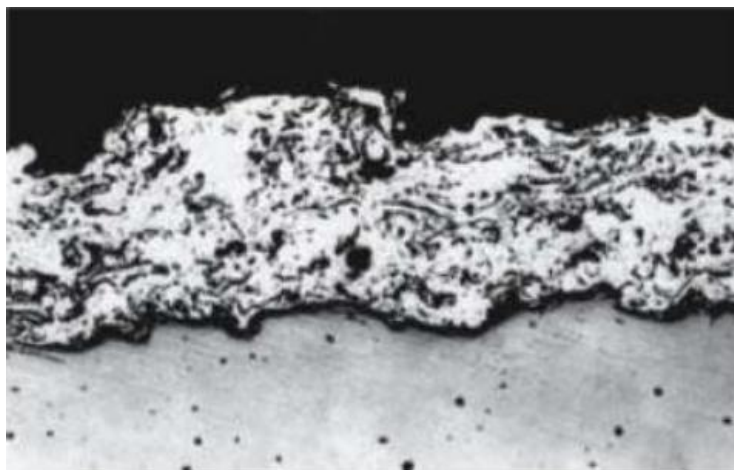
#### 2.2.4. Šeradiranje (difuzijsko pocinčavanje)

Šeradiranje je proces koji se koristi za relativno male dijelove. Primjenjuje se kada se cinčane prevlake nanose na očišćeni čelik tako da dijelovi rotiraju u zatvorenom bubnju u prisutnosti cinkove prašine na temperaturi od 370 °C do 430 °C. Cijevi, matice, svornjaci i ostali mali odljevci su obrađeni na ovaj način. Danas se još rijetko koristi u SAD-u. [2]

#### 2.2.5. Raspršivanje cinka

Raspršivanje cinka je postupak gdje se cink rastaljen u pištolju pomoću stlačenog zraka naštrcava na površinu čelika. Čelik je najčešće ispjeskaren. Cink bi se trebao nanijeti što prije nakon što je površina bila pripremljena da bi se izbjegla oksidacija čelika i osigurao se efektivan metal-metal spoj. Spoj može biti narušen ili zbog oksidacije ili zbog temperature čelika u vrijeme kada je cink nanesen na njega.

Raspršivanje cinka se može izvršiti na dva načina. Prvi je proces u kojem se cink u obliku žice ubacuje u plamen. Struje stlačenog zraka raspršuje rastaljeni metal i odvodi ga iz mlaznice. Žica cinka se dodaje neprekidno u pištolj sve dok pištolj radi. Drugi postupak koristi cinkov prah. Usitnjeni cink je transportiran do pištolja pomoću plina i zagrijan pomoću plamena koji okružuje mlaznicu. Komprimirani zrak daje pokretačku silu pari rastaljenog cinka za udar o metal. Sprejani cink ovog tipa može se primijeniti na konstrukcije bilo koje veličine i oblika. Prevlaka ovisi o operateru koji ju nanosi i o odgovarajućoj vještini da bi se dobio gladak i ravan film na površini. Sprejanje cinka je teško ostvarivo, ako ne i nemoguće u šupljinama, uglovima i sličnim područjima. Na slici 3 dan je prikaz mikrostrukture prevlake cinka dobivene toplinskim naštrcavanjem cinka.



Slika 3. Prevlaka cinka dobivena metalizacijom [2]

### 2.3. Primjena pocinčanih limova

Područje primjene vruće pocinčanih proizvoda je široko: oprema za ceste, rasvjetni stupovi, armature za betoniranje, automobilska i brodograđevna industrija, pomorska oprema, željeznica, elektroprivreda, poljoprivredne konstrukcije, razne ograde, čelično rešetkaste konstrukcije, komunalna oprema za javne gradske površine, metalne cijevi razne namjene te gotovo svi ostali čelični proizvodi izloženi atmosferskim utjecajima. [3]

Iskustva s metalnim prevlakama za infrastrukturne primjene sežu još iz 1940-ih. Zaporni zasuni koji su bili pocinčani su ostali u savršenom stanju bez ikakvog održavanja kroz nekoliko desetljeća. St. Denis Canal Lock Gates u Francuskoj, prevučen 1930. godine je izvanredan primjer. U Velikoj Britaniji ovjesi lanaca i ostale komponente na Menai Straits mostu su bile pocinčane prije 2. svjetskog rata. Tijekom rata most nije bio održavan. Kada su se nakon rata radile kontrole, pocinčani dijelovi mosta bili su u odličnom stanju, a samo premazane čelične konstrukcije su zahrđale. Slika 4 prikazuje most Menai Straits.



Slika 4. Most Menai Straits [5]

Smanjena potreba za održavanjem mosta potaknula je Britance da primjene raspršivanje metalnih prevlaka na brojnim cestovnim i željezničkim mostovima u proteklih 40 godina. Toplinsko naštrecavanje omogućuje postizanje potpune zaštite od korozije bez potrebe održavanja i preko 30 godina. Pedesetogodišnja učinkovita zaštita je zabilježena u ruralnim sredinama, dok je u industrijskim, urbanim i obalnim sredinama njihov vijek nešto više od dvadeset godina. Životni vijek prevlake od cinka, debljine 255  $\mu\text{m}$ , iznosi oko 25 godina koji bi se mogao produžiti za 15-tak godina kada bi na tu prevlaku nanijeli vinilni završni premaz.

Cijena toplinski raspršenog cinka 1998. u SAD-u iznosila je 10\$ po kvadratnom metru ili 0.40\$ po kvadratnom metru za razdoblje od 25 godina [3].

### 3. ZAVARIVANJE POCINČANIH LIMOVA

Postupak zavarivanja pocinčanih predmeta je gotovo isti kao i postupak zavarivanja čelika nezaštićenog površinskim slojem nekog drugog metala istog sastava. Uz male prilagodbe može se koristiti isti postupak, napon, jakost struje, brzina zavarivanja itd.

Razlika između zavarivanja pocinčanog obratka i nepocinčanog je u niskoj temperaturi isparavanja zaštitnog sloja cinka. Cink se tali na temperaturi od oko 420 °C i isparava na temperaturi od približno 900 °C. Dok se, s druge strane, čelik tali na približno 1510 °C, a temperatura električnog luka je između 8300 °C i 11100 °C iz čega proizlazi jasan zaključak da cink u blizini električnog luka isparava. To rezultira slijedećim posljedicama:

- Ispareni cink povećava količinu dima i para nastalih pri zavarivanju
- Cink na zavaru i u njegovoj neposrednoj blizini je spaljen pod utjecajem električnog luka, a ta mjesta ostaju nezaštićena

#### 3.1. Cinkove pare

Kada se cinkova para pomiješa s kisikom iz zraka oni trenutno reagiraju i stvaraju cinkov oksid. Cinkov oksid je netoksičan i nekancerogen. Na temelju istraživanja provedenih s ciljem otkrivanja utjecaja cinkovog oksida na ljude saznaje se da udisanje tih para rezultira osjećajem gripe. No zapravo ne postoje dugotrajni utjecaji na zdravlje. Trenutna istraživanja bave se proučavanjem mehanizma kojim cinkov oksid uzrokuje „groznicu metalnih para“. Simptomi bolesti počinju se osjećati 4 sata nakon udisanja para i za potpuni oporavak potrebno je 48 sati. Simptomi su povišena temperatura, drhtavica, žeđ, glavobolja i mučnina. Kako bi se to izbjeglo potrebno je izbjegavati udisanje cinkovog oksida.

#### 3.2. Sigurnost pri zavarivanju

Cink koji se obično koristi za pocinčavanje vrućim uranjanjem sadrži između 1 % i 2 % olova. Maksimalna količina olova koja se može otopiti u cinku je 0,9 %. Ostatak neotopljenog olova isparava tijekom zavarivanja zajedno s cinkom. Temperatura isparivanja olova je 1650 °C. Olovne pare se spajaju s kisikom u olovni oksid, koji je vrlo otrovan i ne smije se dopustiti njihovo udisanje.

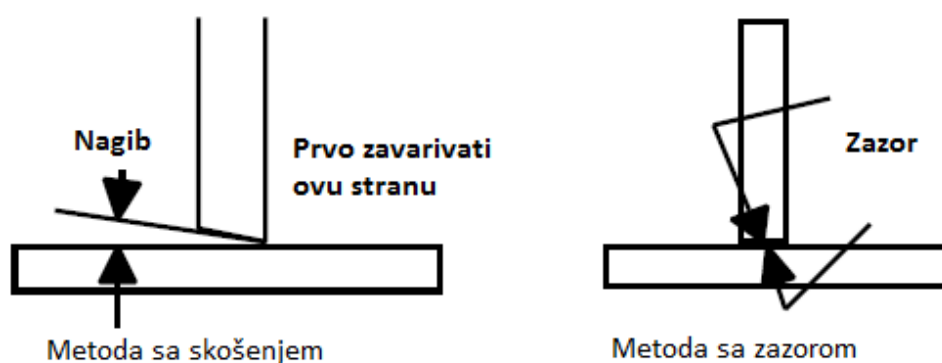
Neki proizvođači za pocinčavanje koriste cink čistoće 99,99 % tako da prilikom zavarivanja proizvoda obloženih ovim cinkom nema opasnosti od para olova.

### 3.3. Svojstva zavora

Zavarivanje pocinčanih predmeta se uspješno primjenjuje već dugo vrijeme, tako da ne postoje nova istraživanja kojima je svrha usporedba svojstava zavora pocinčanih obradaka s nepocinčanim. U pogledu čvrstoće prije 50 godina u industriji je primijećeno da nema razlike kod pocinčanih i nepocinčanih čelika. Novija istraživanja bave se žilavošću zavora, kontrolom poroznosti, izgledom zavora, obnavljanjem korozijske otpornosti i ostalim problemima koji su kompleksniji od čvrstoće zavora.

Kod zavarivanja pocinčanih predmeta REL postupkom nisu potrebne nikakve promjene u tehnici zavarivanja u odnosu na zavarivanje uobičajenih materijala ovime postupkom. S druge strane, kod MIG/MAG zavarivanja potrebno je izvršiti sitne korekcije napona kako bi se moglo kontrolirati prskanje. Također, potrebno je češće čistiti sapnicu pištolja od kapljica metala i cinkova oksida.

Kod zavarivanja pocinčanih obradaka dolazi do povećang stvaranja plinova. Razlog tome je sloj cinka. Što je sloj deblji, nastaje više plinova. Na primjer, kod zavarivanja ploča u T-spoj pojavljuje se problem s odvođenjem plinova. Kako je jedna ploča oslonjena na drugu otežano je odvođenje plinova u atmosferu i postoji mogućnost pojavljivanja poroznosti. Kako bi se taj problem riješio osmišljene su dvije metode. Kod jedne metode, ploče se ne naslanjaju izravno jedna na drugu, već se ostavi zazor između njih. Taj zazor nije velik i prema američkoj literaturi iznosi 1/16 inča, odnosno 0,15 mm. Kod druge metode, primjenjuje se skošenje od  $-15^\circ$  na rubu ploče koja se oslanja rubom. Obje metode značajno pospješuju odvođenje plinova i povećavaju kvalitetu zavora. Na slici 5 prikazane su ilustracije navedenih metoda.



Slika 5. Metode za poboljšavanje odvođenja plinova nastalih pri zavarivanju [6]

### **3.4.    Zaštita od plinova nastalih prilikom zavarivanja pocinčanih limova**

Obuka zavarivača koji rade s pocinčanim materijalima je neophodna, kako bi ih se upoznao sa zaštitom na radu. Zavarivači moraju držati glavu podalje plinova koji nastaju pri zavarivanju kako se plinovi i prašina ne bi nakupljali u njihovim zaštitnim maskama. Ako zavarivač prilikom zavarivanja pocinčanih predmeta pronade u svojoj masci bijelu prašinu, znači da se nije dobro pozicionirao. Bijela prašina je cinkov oksid. Kao dodatak ispravnom pozicioniranju, koriste maske s respiratorom. Maske su prilično slične zaštitnim maskama koje se koriste pri bojenju. One pružaju potpunu zaštitu od prašine i plinova i zavarivanje čine ugodnijim.

Kompliciranije i skuplje rješenje za zaštitu su sustavi vlastitog okoliša u kojima se u masku dovodi zrak. Slijedeća metoda zaštite prakticira uklanjanje para prije nego što one dođu do glave zavarivača. Sustav za uklanjanje sastoji se fleksibilnih cijevi koje se postavljaju u blizini zone zavarivanja i sustava za odvođenje plinova. Nedostatak ove metode je što ima malo područje djelovanja, 30-ak cm od kraja usisne cijevi. Također, nedostatak je što se cijevi moraju pomicati kod dužih zavora. Postoji još nekoliko metoda uklanjanja plinova: ventilacija, sustav s usisnom cijevi na pištolju za zavarivanje i stol s usisnim sustavom.

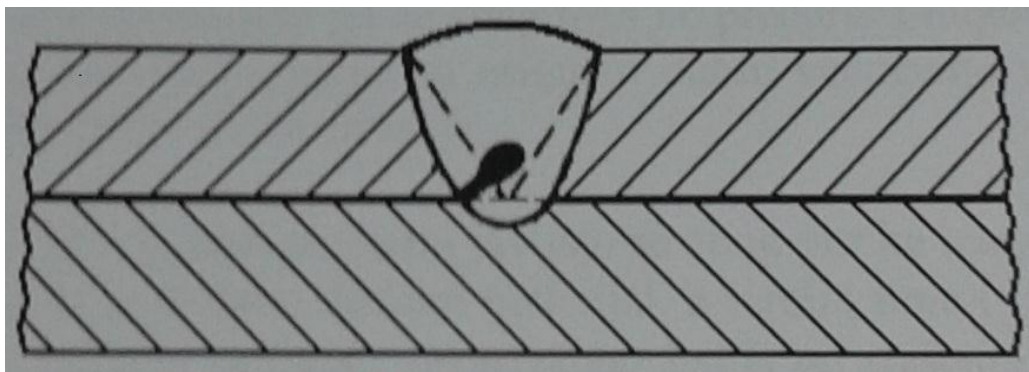
### **3.5.    Obnavljanje otpornosti na koroziju**

Zbog visokih temperatura sloj cinka u blizina zavora isparava i ostavlja nezaštićeno područje. Iako preostali cink pruža određenu zaštitu, pri atmosferskim utjecajima ta zaštita neće biti dovoljna i doći će do korozije. Za obnavljanje zaštitnog sloja preporučuju se zaštitni premazi na bazi cinka. Ta zaštitna sredstva dostupna su u obliku sprejeva ili u tekućem obliku pogodnom za nanošenje pomoću kistova. Prije nanošenja zaštitnog premaza, površinu je potrebno brusiti ili pjeskariti. Zaštitni sloj se može obnoviti i vrućim naštrcavanjem cinka, prije kojeg je, također, potrebno površinu pjeskariti.

### **3.6.    Nastajanje pora i/ili pukotina u zavaru**

Budući da je temperatura električnog luka ( pri MIG/MAG postupku kreću oko 1600 °C ) veća od temperature isparavanja cinka on isparava prilikom zavarivanja. Ako se isparavanje javlja na površini onda to i ne predstavlja veliki problem, jer postoji mogućnost da ispareni cink ode u atmosferu u obliku dima pa kao takav nema značajnog utjecaja na sam zavar. Međutim, problem je kad se javlja isparavanje cinka na rubovima osnovnog materijala ili u samom zavaru. U tom slučaju cink ne može otići u atmosferu, nego pri hlađenju zavora ostaje zarobljen u

metalnu zavaru, a pri tome dolazi i do taloženja cinka na granicama zrna. Ovo taloženje dovodi do stvaranja pukotina u zavarenom spoju posredstvom zaostalih naprežanja. Tako zarobljenom plinskom mjehuriću cinka povećava se pritisak i kada dođe do određene granice nastaje pora ili pukotina u metalu zavara. Pore i pukotine dovode do smanjenja čvrstoće zavarenog spoja. Slika 6 prikazuje grešku u zavaru.



Slika 6. Pora u zavaru [7]

### 3.7. Zavarivanje prije pocinčavanja

Nakon upoznavanja s problemima zavarivanja pocinčanih proizvoda, nameće se pitanje zašto zavarivanje ne prethodi pocinčavanju.

Pocinčavanje nakon zavarivanja i ostalih proizvodnih procesa se koristi, ali treba se izvesti vrlo pažljivo. Obratci se trebaju očistiti u kiselini, zatim kiselinu treba neutralizirati, a tek onda proizvod uroniti u tekući cink. Također, prije uranjanja obradak treba biti potpuno suh, jer zaostala voda u vrućem cinku isparava i rezultira prskanjem. Kod kompliciranijih konstrukcija može biti problematično nanijeti sloj cinka na cijelu površinu, pogotovo ako je konstrukcija sastavljena od cijevi što znači da je slobodan tok kroz cijevi zbog spojeva onemogućen.

Sljedeći problem nastaje kod velikih konstrukcija; njih je teško, a vrlo često i nemoguće uroniti u bazen za pocinčavanje.

Zaključuje se da je puno lakše i jeftinije pocinčavati obratke prije zavarivanja, a ne obratno.

### 3.8. Zavarivanje laserom

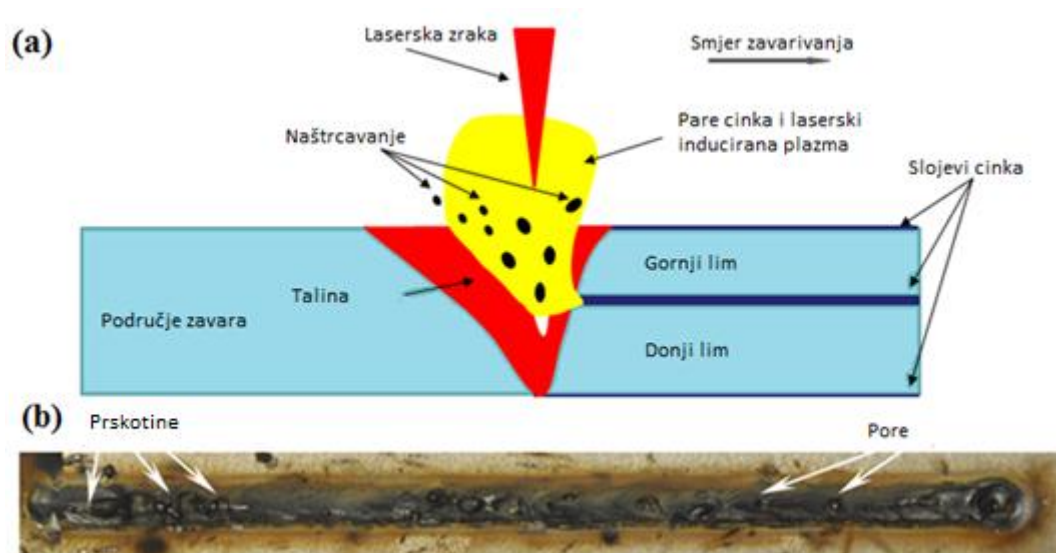
Zavarivanje laserom je postupak u kojem se fokusirana laserska zraka koristi kao pokretni izvor topline, koji služi za spajanje komada metala. Fokusirana laserska zraka ima visoku gustoću energije, a to omogućava velike brzine zavarivanja, duboku penetraciju i usku zonu utjecaja topline. To je postupak koji ne zahtijeva primjenu pritiska. Laserska zraka je koncentrirana zraka monokromatske svjetlosti, to jest elektromagnetskog zračenja. Svjetlost laserske zrake je iste valne dužine i iste faze za razliku od svjetlosne energije običnih izvora. Laserska zraka se može fokusirati i reflektirati na isti način kao i obična svjetlost. Laserski uređaj, osim cijevi u kojoj se odvija stvaranje zrake, sadrži izvor struje, rashladni sustav, te sustav za dobavu plinova i upravljanje.

Primjena pocinčanih limova u autoindustriji je velika i upravo u ovom području zavarivanje laserom ima sve veću primjenu. Preklopni spoj je najčešći u automobilske industriji i u velikoj većini zavaruje se elektrotopno točkasto. No, teška i velika glava stroja ograničava fleksibilnost postupka i dostupnost do skučenih mjesta na kojima je potrebno obaviti zavarivanje. Rješenje tih nedostataka pronalazi se u laserskom zavarivanju, koje uz navedene prednosti pruža i veću čvrstoću spoja i manju distorziju spoja.

Kako bi se smanjila težina automobila i smanjila potrošnja goriva u autoindustriju uvode se novi kvalitetniji čelici, koji se pocinčavaju kako bi im se povećala korozijska otpornost. Lasersko zavarivanje pocinčanih čelika je dosta izazovno. Prilikom zavarivanja sloj cinka isparava zbog niže temperature vrelišta cinka u odnosu na temperaturu tališta čelika. Pare cinka izlaze iz rastaljenog metala ostavljajući iza sebe pore koje značajno narušavaju mehanička svojstva zavara.

Na slici 7 pod (a) prikazana je shema zavarivanja laserom pocinčanih limova, a na (b) je prikazan zavar na kojem se vide greške.





Slika 7. (a) Shematski prikaz laserskog zavarivanja pocinčanih limova  
(b) Prikaz zavora s greškama [8]

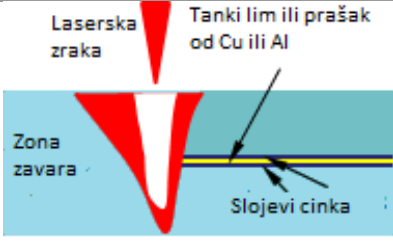
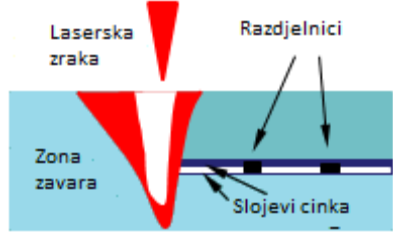
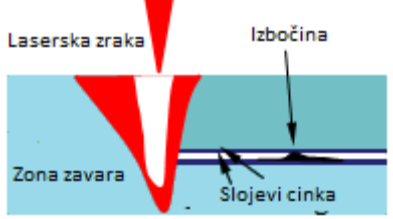
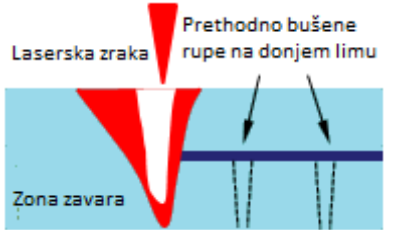
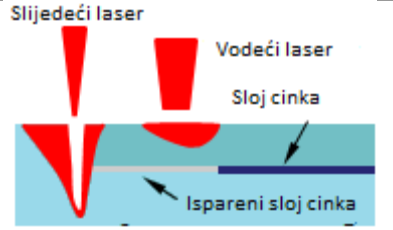
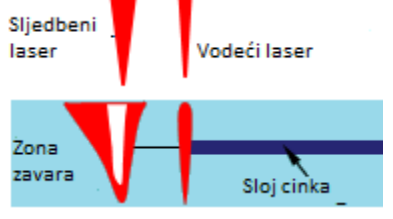
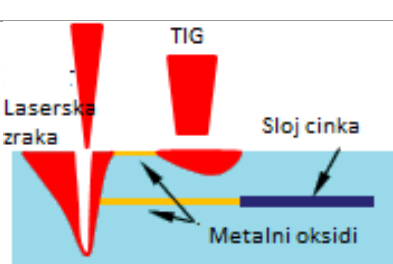
### 3.8.1. Metode zavarivanja laserom

Kroz nekoliko desetljeća u industriji i kroz istraživanja razvijeno je nekoliko tehnologija za zavarivanje pocinčanih limova laserom. U tablici 2 dan je pregled nekoliko metoda.

Tablica 2. Metode zavarivanja pocinčanih limova laserom [8]

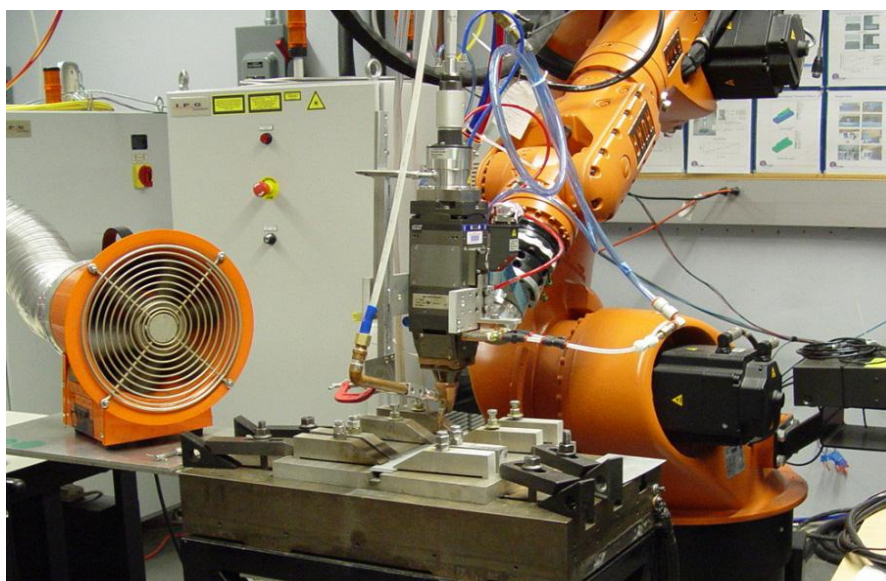
Tehnika rada	Shema	Tehnički detalji	Nedostaci
Udaljiti lasersku zraku ili koristiti laser niske snage		Pare cinka izlaze kroz ključanicu ili kroz bazen taline	Mala brzina zavarivanja i nejednaka kvaliteta zavora
Impulsno zavarivanje laserom		Isparivanje cinka je ublaženo impulsnim zavarivanjem, a pare izlaze kroz ključanicu	Mala brzina zavarivanja i nejednaka kvaliteta zavora
Primjena raznih zaštitnih plinova		Reakcija zaštitnog plina s parama cinka za vrijeme zavarivanja	Mala brzina zavarivanja i nejednaka kvaliteta zavora

Nastavak tablice 2

Stavljanje tankog metalnog lima ili praška na mjesto šava		Cink reagira s dodatnim materijalom prije nego se čelik počne taliti	Problematična primjena u proizvodnji
Primjena prikladnih razdjelnika među dodirnim površinama		Nakupljena para cinka izlazi kroz zazor	Produljenje i poskupljenje procesa
Primjena lasera za izradu izbočina na donjem limu		Nakupljena para cinka izlazi kroz zazor	Navarivanje izbočina produljuje i poskupljuje proces
Bušenje rupa za odvod para na donjem limu		Nakupljena para cinka izlazi kroz provrte	Produljenje i poskupljenje procesa zbog bušenja
Dodavanje dodatnog lasera		Vodeći laser služi za isparivanje sloja cinka	Složena oprema koju je teško uvesti u proizvodnju
Korištenje vodeće zrake za izradu proreza		Kroz prorez izlazi ispareni cink	Potreba za specifičnim razmakom između lasera ograničava uporabu
Primjena TIG postupka kao pomoćnog izvora topline		Predgrijavanje povećava djelotvornost lasera i rezultira stvaranjem stabilne ključanice kroz koji izlazi para	Potreba za specifičnim razmakom između dvaju izvora topline ograničava uporabu

Svaka od navedenih tehnika rada ima određene nedostatke koji otežavaju njihovu integraciju u industriji. No, do sada još nije pronađena povoljnija metoda za zavarivanje pocinčanih limova laserom. Sloj cinka mora se ukloniti prije zavarivanja ili ispariti dodatnim izvorom topline ili se mora osigurati odvod cinkovih para kako bi se izbjeglo prskanje i poroznost.

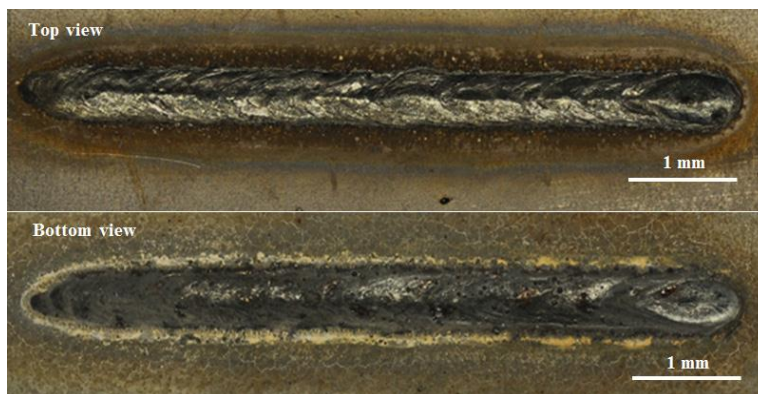
Provedena su brojna istraživanja s ciljem poboljšavanja postupaka zavarivanja pocinčanih limova preklopnim spojem bez zazora. Tako je, između ostalih, provedeno i istraživanje s laserom niske snage, odnosno, niske brzine zavarivanja. Primijećeno je da se cinkove pare iz taline lakše odvede ako je vrijeme solidifikacije dulje. Manja brzina zavarivanja rezultirat će nastankom veće količine taline, a samim time je i vrijeme solidifikacije dulje. Cilj istraživanja je bio pokazati da se ovim postupkom može smanjiti utjecaj cinkovih para na kvalitetu zavora. Slika 8 prikazuje strojeve i opremu korištenu pri ispitivanju. Korišten je laser snage 6 kW, robot sa šest stupnjeva slobode gibanja, a korišteni zaštitni plin bio je argon. Pocinčani lim bio je debljine 1,2 mm i 1,6 mm.



**Slika 8. Oprema korištena u eksperimentu [8]**

Analizom uzoraka ustanovljeno je da se pri snazi lasera od 2 kW i brzini zavarivanja od 5 mm/s ostvaruje zadovoljavajuća kvaliteta površine zavora. Količina taline ostvarena pri niskim brzinama je veća i stabilna. Također, dugotrajnije vrijeme hlađenja taline znatno smanjuje mogućnost ostanka cinkovih para u materijalu zavora. No, mala brzina zavarivanja može rezultirati većim deformacijama, a samim time i manjom čvrstoćom spoja. Ovaj postupak

zavarivanja nije prihvatljiv u industriji zbog male brzine zavarivanja koja bi znatno utjecala na produktivnost. Slika 9 prikazuje uzorke nastale pri provođenju eksperimenta: prikazani su korijen i lice zavora. Na slici se vidi da nema prskanja i da je izgled zavora vrlo kvalitetan.



Slika 9. Prikaz uzorka u dvije projekcije [8]

### 3.9. MIG/MAG zavarivanje

Kod MIG/MAG zavarivanja električni luk se održava između radnog komada i kontinuirane elektrode u obliku žice. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi. Ona može biti inertna ili aktivna. Zaštitni plinovi u inertnoj atmosferi su argon ili helij, a u aktivnoj  $\text{CO}_2$  i mješavine. Mješavine plinova se koriste sa svrhom poboljšanja prijenosa metala i svojstava zavarenog spoja. Uređaj za zavarivanje u oba slučaja je isti. Postupak ima svoje prednosti kao i nedostatke.

Prednosti: [8]

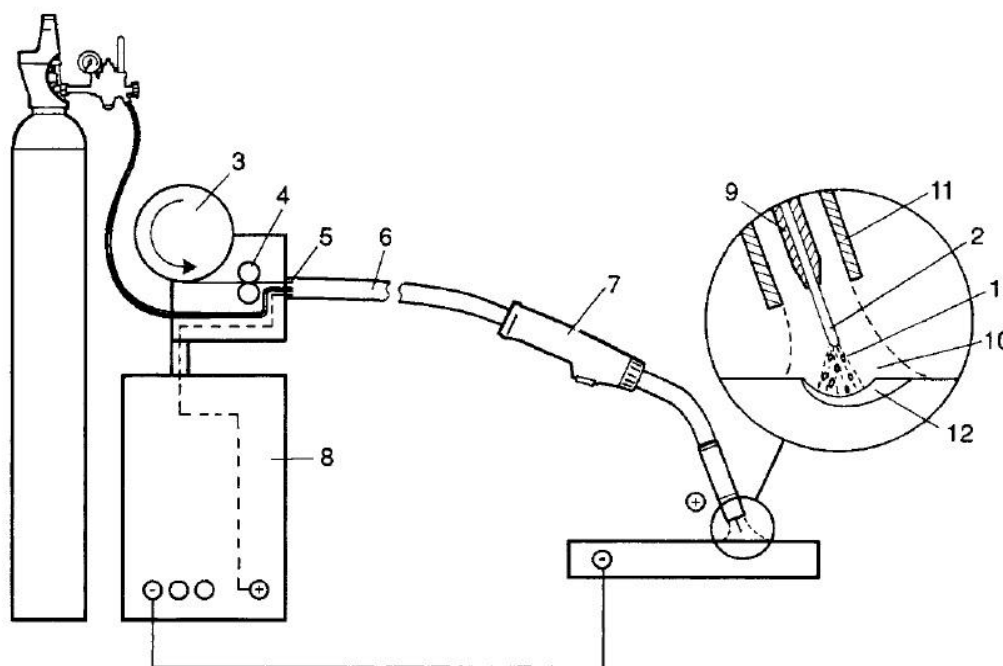
- Kontinuirano dovodjenje žice omogućava formiranje dugih zavora bez prekida električnog luka,
- Postupak se lako automatizira i robotizira,
- Može se koristiti u svim položajima ,
- Nema troske ,
- Ne proizvodi puno dima i para,
- Postoji puno podvrsta postupka koje omogućavaju široku uporabu.

Nedostaci: [8]

- Kontinuiran dovod žice i zaštitnog plina čine opremu kompleksnom, otežavaju njen transport i traže češće održavanje,
- Pri zavarivanju na otvorenom potrebna je zaštita od vjetra,
- Ograničena dostupnost zbog veličine pištolja za zavarivanje,

➤ Mogućnost pojavljivanja prskanja.

Osnovna oprema sastoji se od izvora struje, koluta sa žicom, sustava za dobavu žice, sustava za dovod plina, pištolja za zavarivanje i električnih vodiča. Elektroda u obliku žice kontinuirano se dovodi kroz polikabel do pištolja za zavarivanje. Na slici 10 prikazana je oprema za zavarivanje.



Slika 10. Oprema za zavarivanje s označenim dijelovima [8]

1. Električni luk
2. Taljiva elektroda
3. Namot s dodatnim materijalom
4. Pogonski valjci (kotačići)
5. Spojni ulaz
6. Cijevni paket (polikabel)
7. Pištolj za zavarivanje
8. Izvor struje
9. Kontaktna cjevčica
10. Zaštitna atmosfera
11. Sapnica
12. Zavar

Pogonski sustav konstantnom brzinom dodaje žicu kroz polikabel i pištolj u električni luk. Žica je istovremeno i elektroda i dodatni materijal. Slika 11 prikazuje unutrašnjost dodavača žice.



**Slika 11. Unutrašnjost dodavača žice [10]**

Zavarivanje pocinčanih obradaka elektrolučnim zavarivanjem je relativno komplicirano. Mnogi problemi pri zavarivanju rezultat su niske temperature tališta cinka (  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  ) i temperature isparavanja (  $910\text{ }^{\circ}\text{C}$  ), koje su poprilično manje od temperature tališta čelika (  $1538\text{ }^{\circ}\text{C}$  ). Cinkove pare i oksidi uzrokuju poroznost, loše miješanje materijala, pukotine, prskanje i nestabilan električni luk. Zbog navedenih razloga potrebno je provesti određene adaptacije procesa kako bi se problemi uklonili. Kao jedno od rješenja nameće se korištenje dodatnog materijala s nižom temperaturom tališta.

### **3.9.1. Postupak zavarivanja**

Koristi se tanka žica dodatnog materijala promjera između 0,8 mm i 1,6 mm. Visoka gustoća struje proizlazi iz malog promjera žice i iznosi oko  $200\text{ A/mm}^2$ . [11] Koristi se napajanje s konstantnim naponom što omogućava trenutno samopodešavanje duljine električnog luka, tako da ona uvijek bude jednaka. Napajanje je konstruirano tako da povišuje struju zavarivanja kada se skрати električni luk pa se dodatni materijal brže tali i duljina električnog luka ostaje jednaka. Kada zavarivač poveća duljinu električnog luka struja se smanjuje, potrošnja žice je manja, a duljina luka ostaje jednaka kao i prije.



Vrste prijenosa metala koje se najčešće koriste kod zavarivanja pocinčanih limova: [11]

1. Prijenos štrcajućim lukom – vrsta procesa koja koristi visok napon i struju, koristi se za zavarivanje u horizontalnom položaju materijala koji su dovoljno debeli da spriječe protaljšivanje
2. Prijenos kratkim spojevima – postupak se koristi za zavarivanje tankih limova

### **3.9.2.    *Zaštitni plinovi***

Za zavarivanje pocinčanih materijala najčešće se koristi CO<sub>2</sub> kao zaštitni plin. On pruža odličnu penetraciju, ali može uzrokovati pojavu prskanje. Kako bi se izbjeglo prskanje potrebno je koristiti mješavine plinova. Nešto skuplja kombinacija plinova je Ar/CO<sub>2</sub> ili Ar/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> koja pruža dobru penetraciju, odličan izgled zavora i manje prskanja. Mješavina 92 % Ar, 5 % CO<sub>2</sub>, i 3 % O<sub>2</sub> pruža odlične rezultate kod zavarivanja limova debljine do 3 mm. [11]

### **3.9.3.    *Parametri zavarivanja***

Brzina zavarivanja pocinčanih limova treba biti nešto sporija nego brzina kod zavarivanja nepocinčanih materijala, iz razloga što se treba dati sloju cinka vremena da sagori ispred taline. Promjena brzine određuje se na temelju debljine sloja cinka, vrsti spoja i položaju zavarivanja. U prosjeku brzina zavarivanja je manja između 10 % i 20 %.

Kod kutnih spojeva poželjno je povećati struju zavarivanja za otprilike 10 A. [11] Razlog tome je što se s većom strujom povećava unos topline koji pomaže pri sagorijevanju cinka ispred taline.

Penetracija kod pocinčanih materijala je manja nego kod nepocinčanih tako da kod sučeonih zavora treba ostaviti veći razmak između dijelova koji se spajaju. Lagano njihanje pri zavarivanju pomaže pri ostvarivanju ujednačenije penetracije u horizontalnom položaju.

Kod zavarivanja u vertikalnom položaju potrebno je smanjiti brzinu zavarivanja između 25 % i 30 % ovisno o debljini sloja cinka i vrsti spoja. [11] Brzina se smanjuje iz razloga što cinkove pare mogu utjecati na stabilnost električnog luka, a s manjom brzinom zavarivanja daje im se dovoljno vremena da izađu iz zone zavarivanja. Također, kod sučeonih spojeva potrebno je malo smanjiti brzinu zavarivanja.

Slika 12 prikazuje primjer zavarenog pocinčanog predmeta.



Slika 12. Primjer zavora na pocinčanoj ogradi [11]

### 3.10. Lemljenje

Lemljenje je jedan od najstarijih poznatih načina spajanja materijala. To je postupak spajanja dvaju ili više obradaka pomoću dodatnog materijala. Temperatura taljenja dodatnog materijala je niža od temperature taljenja osnovnog materijala. Prema temperaturi tališta lema, lemljenje se dijeli na meko lemljenje s temperaturom tališta ispod 450 °C i tvrdo lemljenje s talištem iznad 450 °C.

Prednosti lemljenja: [17]

- Manji unos topline u usporedbi sa zavarivanjem,
- Manja distorzija osnovnog metala zbog manjeg unosa topline,
- Dodatni materijal je duktilan i relativno mek, što omogućuje lakšu strojnu obradu,
- Čvrstoća spojeva je vrlo dobra,
- Oprema je jednostavna za korištenje,
- Mogućnost spajanja raznorodnih materijala.

Nedostaci lemljenja: [17]

- Čvrstoća lema uvjetovana dodatnim materijalom,
- Dopuštene radne temperature proizvoda su niže,
- Moguća osjetljivost na galvansku koroziju,
- Moguće razlike u boji lema u odnosu na osnovni metal.

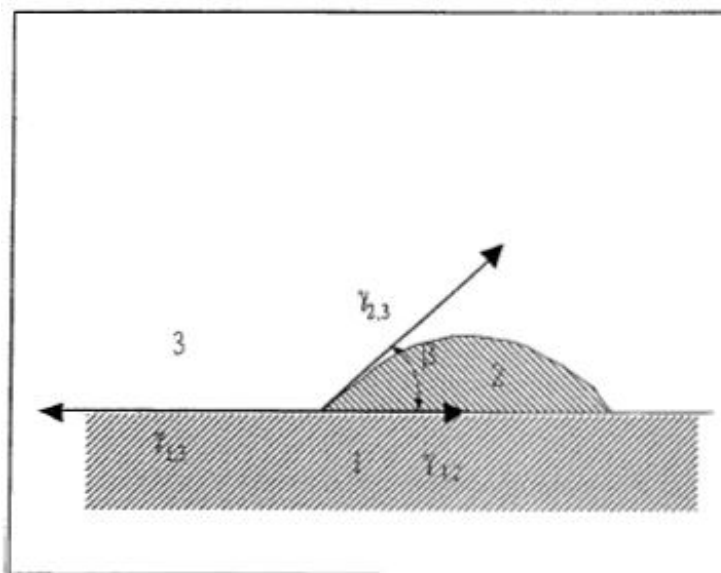


Budući da je temperatura tališta dodatnog materijala niža od temperature taljenja osnovnog materijala ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, a samim time i do mijenjanja njegove prvobitne strukture.

Zalemljeni spoj se ostvaruje na osnovu sljedećih pojava: [18]

- Kvašenje površine osnovnog metala lemom,
- Adhezijske sile,
- Dufuzija,
- Mehaničko sidrenje.

Da bi došlo do kvašenja osnovnog metala rastaljenim lemom potrebna je energija koja se dovodi toplinom. Kvašenje je bolje što je temperatura viša. Također, važno je da na površinama osnovnog metala nema oksida, prevlaka i nečistoća. Adhezivne sile između lema i osnovnog metala moraju savladati kohezijske sile samog lema. Kako bi to bilo moguće površina se čisti mehanički i kemijski prije samog lemljenja. Kemisjko čišćenje se za vrijeme lemljenja najčešće vrši pomoću talila koje rastvara površinski sloj i reducira oksidni sloj, a i štiti površinu od daljnje oksidacije. Kapilarno djelovanje lema ovisi o čistoći površine i širini zazora. Kvašenje se definira kutem na mjestu spoja lema i osnovnog metala. [18] Slika 13 prikazuje sile na granicama medija.



Slika 13. Sile na granicama medija [18]

1 – osnovni materijal

2 – lem

3 – atmosfera u kojoj se lemi

$\beta$  – kut kvašenja

$\gamma_{1,2}$  – sila površinske napetosti između osnovnog metala i lema

$\gamma_{2,3}$  – sila površinske napetosti između lema i atmosfere u kojoj se lemi

$\gamma_{1,3}$  – sila površinske napetosti između osnovnog materijala i atmosfere u kojoj se lemi

Kriteriji ocjene kvašenja su: [17]

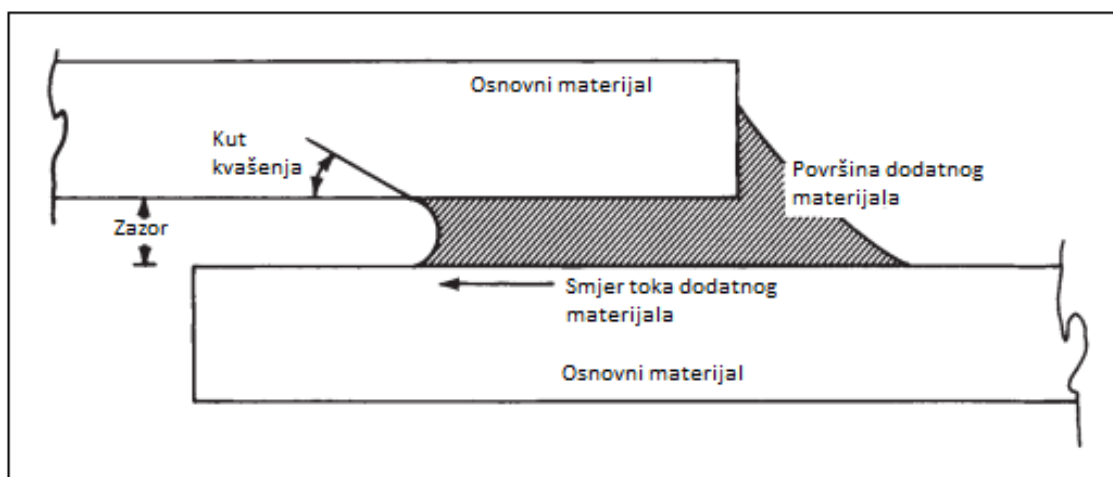
$\beta < 30^\circ$  - dobro kvašenje

$30^\circ < \beta < 80^\circ$  - otežano kvašenje

$\beta > 80^\circ$  - loše kvašenje

### 3.10.1. MIG lemljenje

MIG lemljenje je postupak spajanja dvaju metala taljenjem dodatnog materijala, tj. elektrode, korištenjem električnog luka. Taljenje se odvija u zaštitnoj atmosferi. Zaštitna atmosfera može biti inertna ili mješavina plinova. Kod MIG lemljenja temperatura taljenja kreće se između  $960^\circ\text{C}$  i  $1000^\circ\text{C}$ . Pri tim temperaturama ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, tali se samo dodatni materijal. Zbog toga ne dolazi do miješanja dodatnog materijala s osnovnim materijalom. Spoj se ostvaruje mehaničkim sidrenjem i površinskom difuzijom dodatnog materijala u osnovni materijal. Slika 14 prikazuje shemu zalemljenog spoja.



Slika 14. Shema zalemljenog spoja [17]

Električni luk uspostavlja se između elektrode koja je spojena na (+) pol izvora istosmjernice struje i osnovnog materijala. Žica se tali toplinom nastalom u električnom luku.

Oprema koja se koristi za MIG lemljenje u načelu je ista kao i oprema koja se koristi za MIG/MAG zavarivanje.

Žica koja se koristi za MIG lemljenje niže je čvrstoće nego obična žica za MIG zavarivanje. Zbog niske čvrstoće žice poželjno je da duljina polikabela ne prelazi duljinu od 3 metra.

Svi dodatni materijali koji se koriste za MIG lemljenje moraju se sastojati od minimalno 80 % bakra. Dodatni materijali legirani su silicijem, aluminijem, kositrom, manganom, niklom i dr. Za MIG lemljenje pocinčanih limova najčešće se koristi žica oznake SG – CuSi3.

#### 3.10.1.1. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi imaju velik utjecaj na geometriju spoja, brzinu lemljenja, stabilnost procesa, pojavu prskanja, kvašenje, unos topline, pojavu poroznosti itd. Različiti zaštitni plinovi utječu na karakteristike prilikom lemljenja, na izgled lema i na geometriju samog soja.

Protok plina jako je bitan i ovisi o načinu prijenosa materijala i ostalim utjecajnim parametrima protok plina kreće se u vrijednostima od 10 l/min do 20 l/min za žicu promjera 1 milimetar.

U tablici 3 prikazane su najčešće korištene mješavine zaštitnih plinova:

**Tablica 3. Najčešće korištene mješavine zaštitnih plinova [16]**

Zaštitni plin
Ar + 1 % O <sub>2</sub>
Ar
Ar + 2,5 % CO <sub>2</sub>
Ar + 2 % H <sub>2</sub>
Ar + 2 % N <sub>2</sub>
Ar + 30 % He

Kao zaštitni plin najčešće se koristi plin argon ili mješavine plinova s argonom. Argon omogućuje dobru stabilnost električnog luka, zadovoljavajući izgled spoja, koji nije gladak. Nadvišenje spoja je dobro, kao i kvašenje. Negativan utjecaj argona kao zaštitnog plina je velika širina ZUT-a. [16]

#### **Utjecaj mješavine plina sa 99 % Ar + 1 % O<sub>2</sub>**

Ova mješavina daje dobar izgled zalemljenog spoja, glatki sjajni lem zlatne boje. Kvašenje kod ove mješavine je vrlo dobro, a nadvišenje lema je malo. Veličina ZUT-a je prihvatljiva kao i širina odgorenog područja cinka. Primjenom ove mješavine javlja se osjetljivost električnog luka na magnetsko puhanje. [7]

**Utjecaj mješavine plina sa 97,5 % Ar + 2,5 % CO<sub>2</sub>**

Primjenom ove mješavine dobiva se zadovoljavajući izgled zalemljenog spoja, gladak i sjajan lem zlatne boje, dobro nadvišenje lema, vrlo dobro kvašenje, mala širina odgorenog područja cinka i mala širina ZUT-a. [7]

**Utjecaj mješavine plina sa 98 % Ar + 2 % He**

Ova mješavina daje jako dobar izgled zavarenog spoja, glatku površinu lema koja je polusjajne tamno žute boje, dobro kvašenje, veće nadvišenje lema. Korištenjem ove mješavine javlja se velika osjetljivost na magnetsko puhanje. [7]

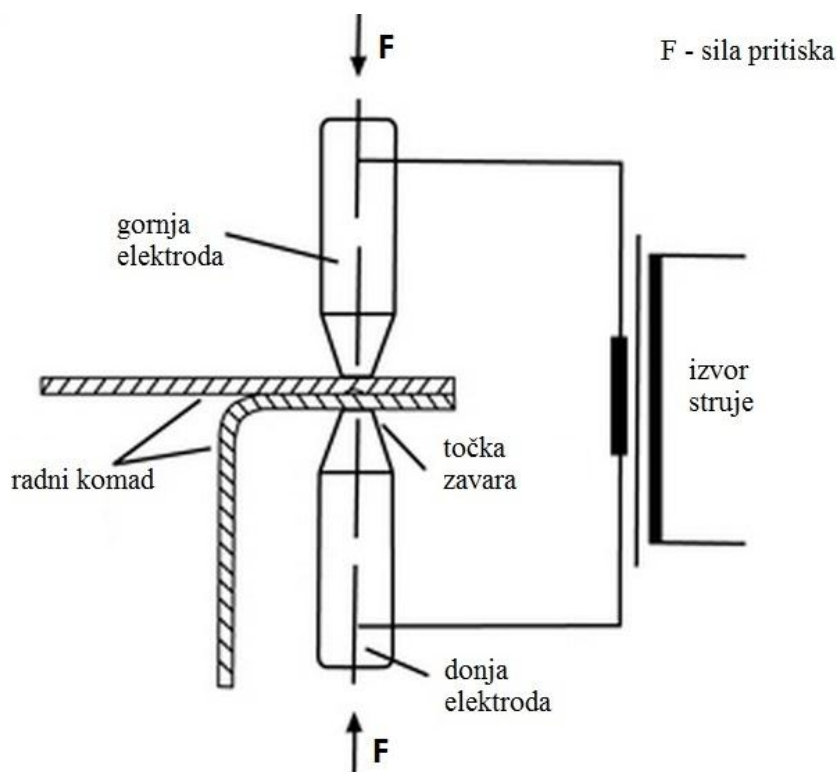
**3.11. Elektrootporno točkasto zavarivanje**

Elektrootporno zavarivanje jedan je od najčešće i najjednostavnije automatiziranih i robotiziranih postupaka zavarivanja, a obuhvaća grupu postupaka kod kojih se materijal zagrijava toplinom stvorenom električnim otporom. Zavareni spoj nastaje djelovanjem sile pritiska između elektroda. Električnim otporom stvara se toplina koja se koristi za zagrijavanje određene količine materijala na temperaturu zavarivanja, kao i za zagrijavanje materijala u okolnoj zoni. Koristi se izmjenična struja niskog napona i visoke jakosti te kratkog trajanja.

Točkasto zavarivanje je preklopno zavarivanje taljenjem dvaju dijelova stegnutih između dvije elektrode, kroz koje se dovodi električna struja. Na dodirnom se mjestu obaju dijelova koji se zavaruju oslobađa Jouleova toplina, koja rastali materijal te dolazi do njihovog miješanja. Nastali zavar ima oblik točke, a presjek mu je u obliku leće.

Zagrijavanje pri elektrootpornom zavarivanju je kratkotrajno (od mikrosekunde do nekoliko sekundi) i neravnomjerno, pri čemu se najviše zagrijava središnji dio točke (jezgra) jer je tamo jačina struje najveća. U početnoj fazi zagrijavanja u jezgri počinje skupljanje krupnih zrna pod djelovanjem sile pritiska, tj. zavarivanje bez taljenja. Daljnjim zagrijavanjem jezgra se tali, a njezinim očvršćivanjem nastaje zavareni spoj.

Na slici 15 prikazana je shema točkastog zavarivanja.



Slika 15. Shema točkastog elektrootpornog zavarivanja [12]

Elektrootporno točkasto zavarivanje pocinčanih limova dugo je bilo problematično za izvesti. No, uz pomoć raznih istraživanja i iskustava iz industrije razvijeno je rješenje za taj problem. Osnovni problem kod zavarivanja pocinčanih limova je generiranje dovoljno topline za zavarivanje, a da se značajno ne ošteti sloj cinka. Problem kod cinka je u njegovim niskim temperaturama taljenja i vrelišta, kako je to već ranije spomenuto. Cink se spaja s bakrom iz elektroda i stvara pod utjecajem topline i pritiska mjed.

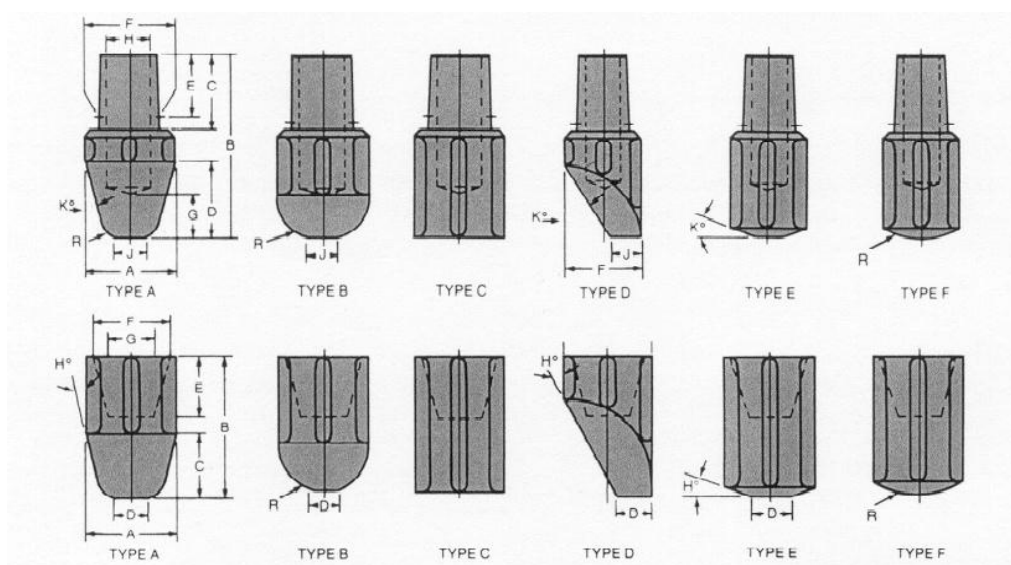
U slučaju dovoljno dovedene količine topline na mjesto zavora kod pocinčanih limova, cink će ispariti s površine. Oko zavora formira se bijeli prsten cinkovog oksida. Isparavanje cinka s površine ispod elektrode ostavlja na trenutak mali zazor između elektrode i površine, ali zazor vrlo brzo nestaje zbog djelovanja sile pritiskanja.

Elektrode na kojima se stvorio sloj mjedi stvara se dodatni otpor, a samim time i više topline. S ponavljanjem zavarivanja taj sloj se povećava, dovodi se sve više topline, a kvaliteta zavora sve više opada. Jedno od rješenja ovog problema je u kontroli struje zavarivanja, tako da se ona smanjuje kako se povisuje udio mjedi kako ne bi došlo do porasta unosa topline.

Zavarivanje pocinčanih limova traje duže nego zavarivanje nepocinčanih. Nažalost, duže vrijeme zavarivanja skraćuje vijek trajanja elektroda. Rješenje za produljivanja vijeka trajanja

elektroda je u impulsnom zavarivanju. Impulsno zavarivanje omogućuje operateru da jedan duži impuls podijeli na tri manja. Nakon nekoliko ciklusa uzme se vrijeme za ohlađivanje i na taj način se produljuje vrijeme trajanja elektrode. Druga dobra strana impulsnog zavarivanja je ta što daje kvalitetnije zavare.

Ove metode su dosta skupe pa su razvijene zaštitne kapice za elektrode. Kapice su napravljene od posebnih legura koje produžuju vijek trajanja elektroda. Kada se kapice istroše, jednostavno se zamijene novima. Na slici 16 prikazano je nekoliko vrsta kapica za elektrode, a na slici 17 prikazan je postupak zavarivanja pocinčanih limova.



**Slika 16.** Kapice za elektrode za EO točkasto zavarivanje [13]



**Slika 17.** Postupak EO točkastog zavarivanja pocinčanih limova [14]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Opis eksperimenta

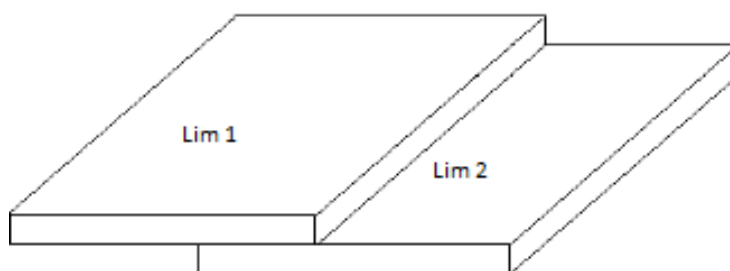
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je bilo odabrati prikladni postupak zavarivanja i odgovarajući dodatni materijal za tvrdo lemljenje pocinčanih limova. Također, potrebno je bilo definirati parametre zavarivanja i na zavarenim uzorcima ocijeniti utjecaj parametara na kvalitetu zavora kao i površinu pocinčanog sloja.

Eksperimentalni dio projekta izveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, na Katedri za zavarene konstrukcije. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za zavarene konstrukcije.

### 4.2. Postupak zavarivanja

Odabrani postupak za izvođenje eksperimenta je MIG lemljenje. MIG lemljenje opisano je u poglavlju 3.10.1.

Odabran je preklopni spoj. Na slici 18 prikazan je preklopni spoj.



Slika 18. Preklopni spoj

Mehanička priprema rubova radnih komada nije potrebna jer se radi s limovima male debljine (3 mm). Da bi se osiguralo dobro kvašenje i prijanjanje dodatnog materijala na osnovni, limovi moraju biti očišćeni i odmašćeni. Talilo nije potrebno.

Kao zaštitni plin korišten je argon. Argon omogućuje dobru stabilnost električnog luka, zadovoljavajući izgled spoja, koji nije gladak. Nadvišenje spoja je dobro, kao i kvašenje. Negativan utjecaj argona kao zaštitnog plina je velika širina ZUT-a. [16]



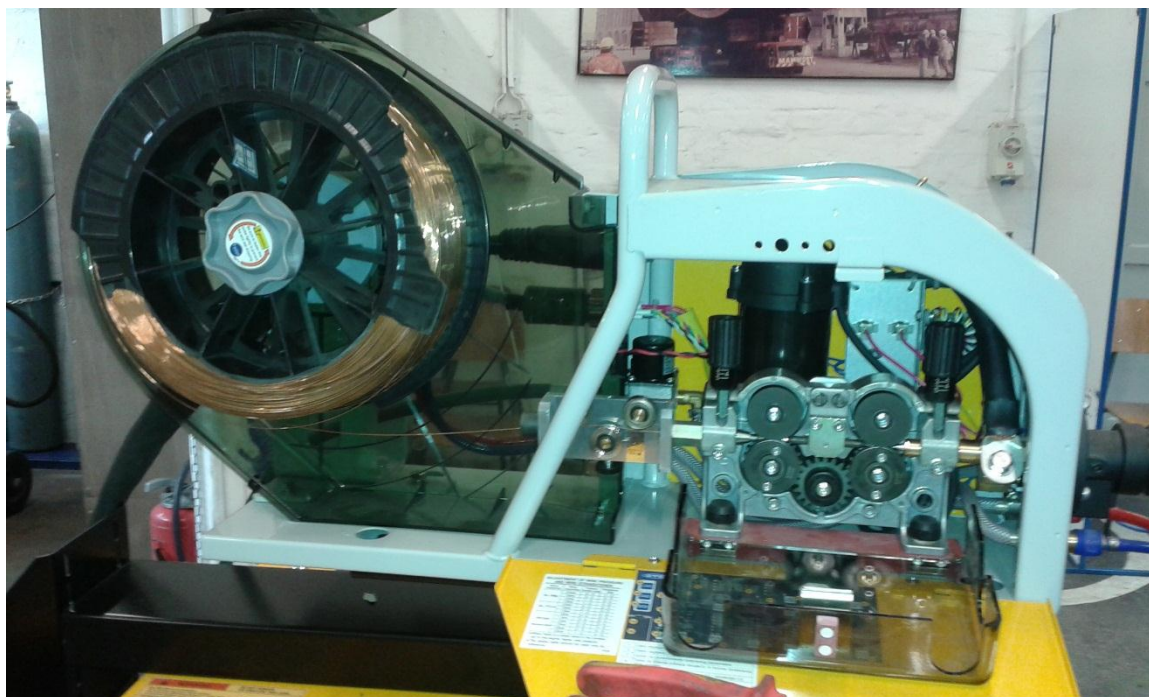
### 4.3. Oprema

Korišteni uređaj za MIG tvrdo lemljenje bio je Welbee P500L. Na slici 19 prikazan je uređaj korišten u eksperimentu, a na slici 20 prikazan je sustav za dobavu žice.



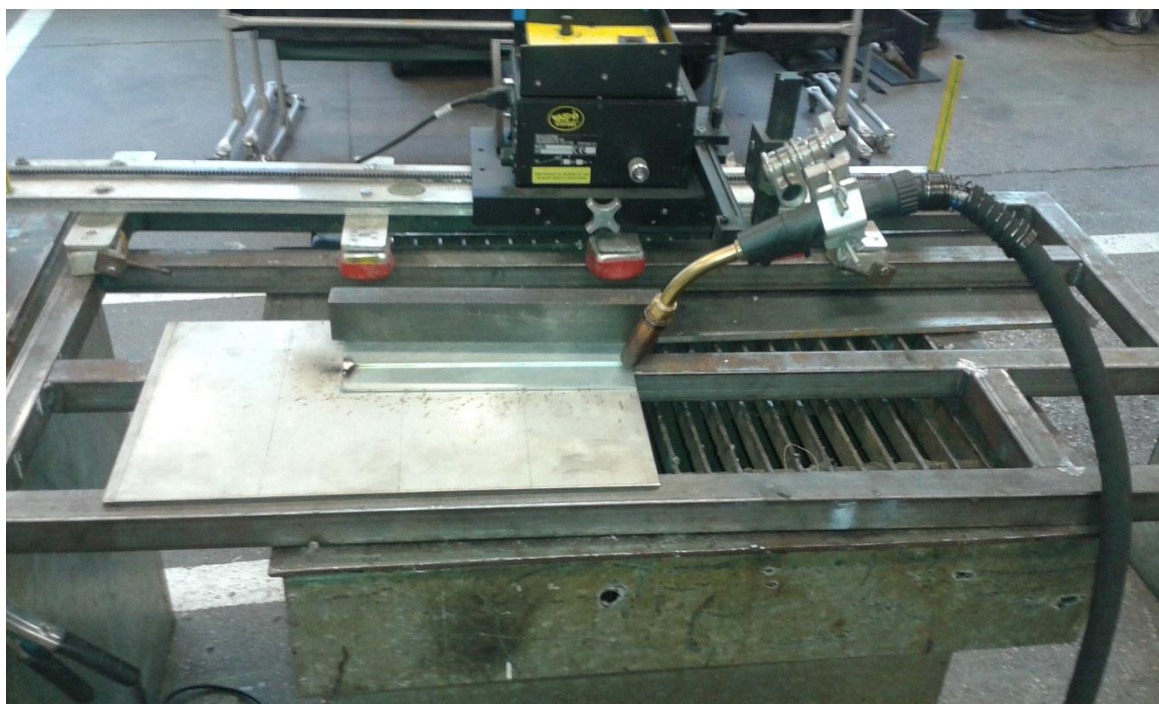
Slika 19. Uređaj korišten za MIG tvrdo lemljenje - Welbee P500L





Slika 20. Sustav za dobavu žice

Radi postizanja konstantne brzine lemljenja, za vođenje pištolja, korišten je automat BUG-O Systems s mogućnošću podešavanja konstantne brzine vođenja. Slika 21 prikazuje sustav BUG-O za vođenje.



Slika 21. Automat za vođenje pištolja – BUG-O Systems

#### 4.4. Tehnološki i tehnički podaci o radnim komadima i postupku zavarivanja

Prije izvođenja eksperimenta određeni su tehnološki i tehnički parametri. Odabran je materijal s tri različite debljine zaštitnog sloja cinka, određene su dimenzije limova, definirana je tehnika rada, zaštitni plin, dodatni materijal, tip spoja itd.

Materijal: pocinčani lim; S355,

Debljina lima, [mm]: 3,

Dimenzije uzorka (dužina  $\times$  širina), [mm]:  $300 \times 150$ ,

Tip spoja: preklopni spoj,

Položaj lemljenja: horizontalni položaj,

Zaštitni plin: 100 % argon,

Protok plina, [l/min]: 12,

Vrsta žice: CuSi3,

Promjer žice, [mm]: 1,

Slobodni kraj žice, [mm]: 14,

Tehnika rada: lijeva tehnika,

Nagib pištolja, [°]: 10 unazad.

Limovi su bili zapakirani u plastičnu foliju tako da su bili relativno čisti, ali ipak su prije lemljenja bili očišćeni alkoholom za čišćenje.

Korišteni su limovi s tri različite debljine sloja cinka, kako je prikazano u tablici 4.

**Tablica 4. Debljine limova korištenih u eksperimentu**

Debljina, [ $\mu\text{m}$ ]
5...8
10...15
15...20

Korištene su tri debljine zaštitnog sloja cinka kako bi se moglo utvrditi odgovaraju li idealni parametri lemljenja za jednu debljinu sloja cinka lemljenju limova s drugom debljinama sloja cinka.

Slika 22 prikazuje pripremljene limove za lemljenje.



**Slika 22. Pripremljeni limovi za lemljenje**

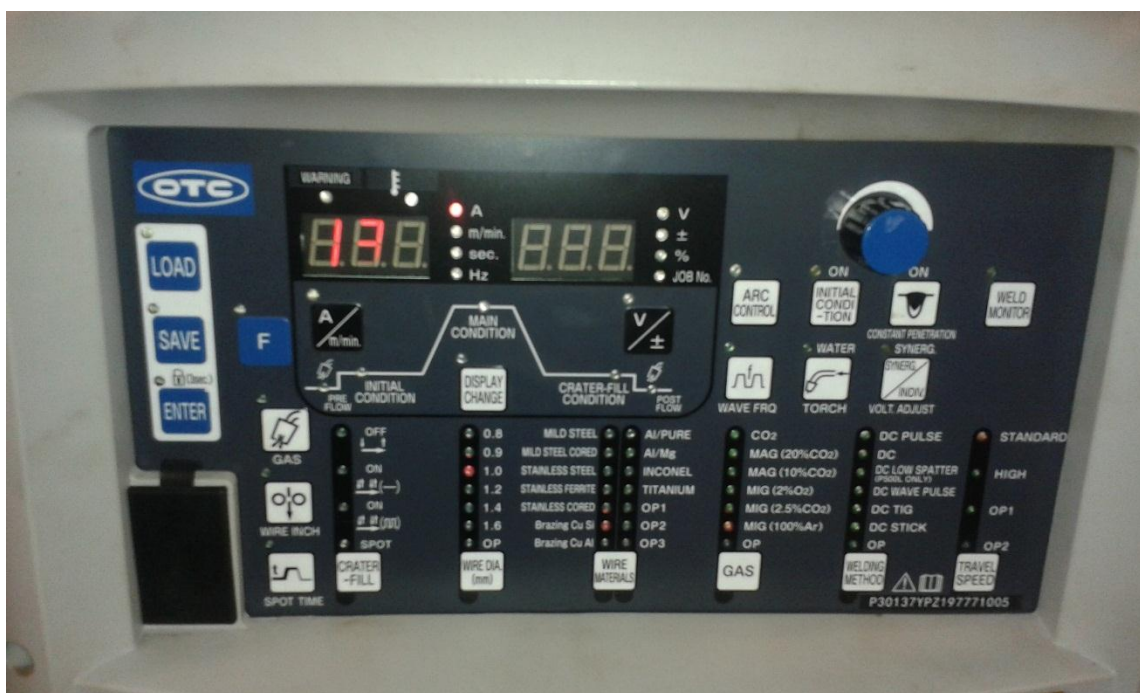
Početni parametri prikazani su u tablici 5.

**Tablica 5. Početni parametri**

Zaštitni plin	Protok plina, [l/min]	Promjer žice, [mm]	Jakost struje, [A]	Napon, [V]	Brzina lemljenja, [m/min]
Argon	12	1,0	130	16	0,4

Početni parametri određeni su proučavanjem radova koji su obradili sličnu temu. Ti parametri daju nam predodžbu o redu veličine optimalnih parametara, koje želimo postići. Na slici 23 prikazana je upravljačka ploča uređaja na kojoj su unešeni početni parametri.





Slika 23. Upravljačka ploča s unijetim parametrima

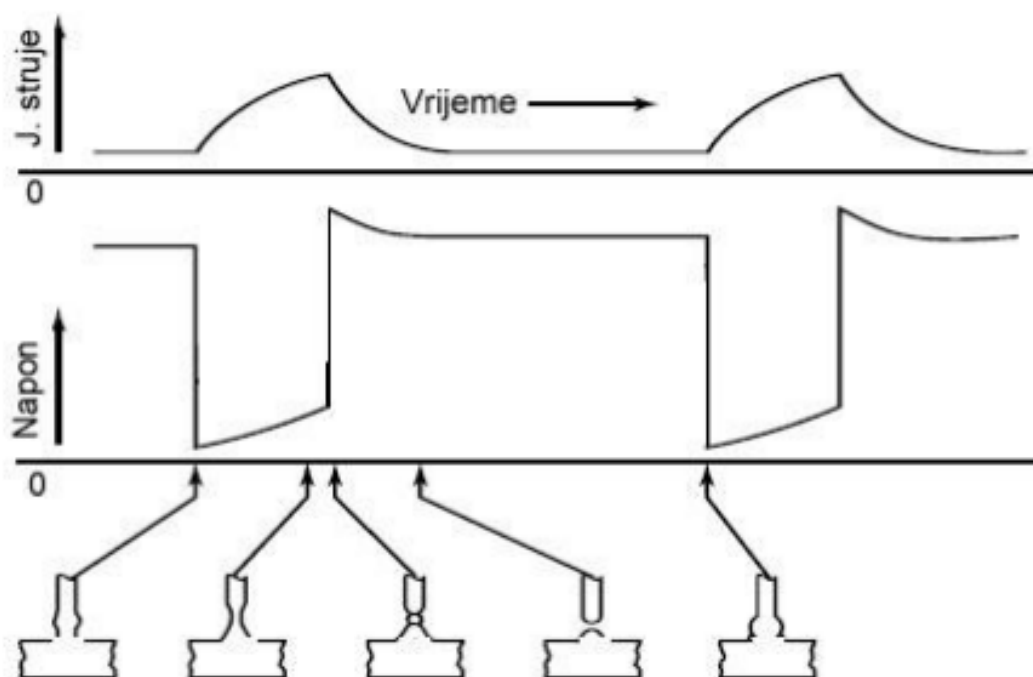
Cilj eksperimenta je pronaći optimalne parametre na jednom od uzoraka i te parametre usporediti s uzorcima s drugačijom debljinom zaštitnog sloja cinka.

Za određivanje optimalnih parametara uzeti su uzorci s debljinom zaštitnog sloja cinka od 5  $\mu\text{m}$  do 8  $\mu\text{m}$ .

Kako bi se izbjeglo neželjeno isparavanje cinka i deformacija limova unos topline treba biti što manji, iz tog razloga korišten je prijenos materijala kratkim spojevima.

Prijenosom metala kratkim spojevima ostvaruje se mala količina rastaljenog metala pa je upravo zbog toga prikladan za zavarivanje tankih limova. No, u tom području minimalnog unosa topline postupak je osjetljiv na prskanje rastaljenih kapljica kao posljedica nestabilnog procesa. Prskanje narušava kvalitetu spoja i poskupljuje postupak zahtijevajući naknadnu obradu.

Na slici 24 dan je prikaz dinamičke karakteristike izvora struje kod prijenosa metala kratkim spojevima.



Slika 24. Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje zavarivanja [15]

Tehnika rada je lijeva kako bi se minimizirao unos topline i smanjilo oštećenje sloja cinka. Električni luk se mora usmjeriti u vodeći rub taline lema. Pištolj za zavarivanje je nagnut unazad za  $10^\circ$ . Ovaj položaj pištolja omogućava isparavanje cinka malo ispred pištolja. To je povoljno jer pare koje nastaju ne ulaze u zonu zaštitnog plina i ne ometaju djelovanje električnog luka. Za određivanje optimalnih parametara uzeti su limovi s debljinom zaštitnog sloja cinka između  $5\text{ }\mu\text{m}$  i  $8\text{ }\mu\text{m}$ . Tijekom zavarivanja praćene su promjene parametara u odnosu na početne parametre, a to je prikazano u tablici 6.

Tablica 6. Parametri lemljenja limovimova sa slojem debljine cinka između  $5\text{ }\mu\text{m}$  i  $8\text{ }\mu\text{m}$  – Uzorak 1

Parametri	Jakost struje, [A]	Napon, [V]
Početni	130	16
Tijekom lemljenja	140	16,5

Iz tablice je vidljivo da je tijekom zavarivanja došlo do porasta jakosti struje i napona. Jakost struje je porasla za 10 A, a napon za 0,5 V. Ta razlika u parametrima je posljedica održavanja stabilnosti električnog luka. Na slici 25 prikazano je lice spoja, a na slici 26 naličje.



Slika 25. Uzorak 1 - lice

Sa slike je vidljivo da je lem vrlo dobrog izgleda, bez pukotina i pora. Vidi se da je došlo do blagog prskanja i da je ogorina mala. Širina lema je 9 mm, a širine ogorine 2 mm.



Slika 26. Uzorak 1 - naličje

Vidljiva je ravnomjerna promjena boje u području lema. Nije došlo do protaljivanja lima i izgaranja sloja cinka. Izgled je vrlo dobar.

Na temelju viđenog zaključuje se da su parametri dobri i uzet će se kao optimalni za ovaj materijal. Sljedeći uzorci će se uspoređivati s ovim kako bi se vidjela ovisnost kvalitete lema istih parametara o debljini zaštitnog sloja cinka.

Sljedeći lem izveden je na limovima s debljinom zaštitnog sloja cinka između 10  $\mu\text{m}$  i 15  $\mu\text{m}$  (uzorak 2). Promjene parametara prikazane su u tablici 7.

**Tablica 7. Parametri lemljenja limovima sa slojem debljine cinka između 10  $\mu\text{m}$  i 15  $\mu\text{m}$  – Uzorak 2**

Parametri	Jakost struje, [A]	Napon, [V]
Početni	130	16
Tijekom lemljenja	143	16,3

Iz tablice je vidljivo da je tijekom lemljenja došlo do porasta jakosti struje i napona. Porast jakosti struje je nešto veći nego kod uzorka 1. Jakost struje je porasla za 13 A, a napon za 0,3 V.

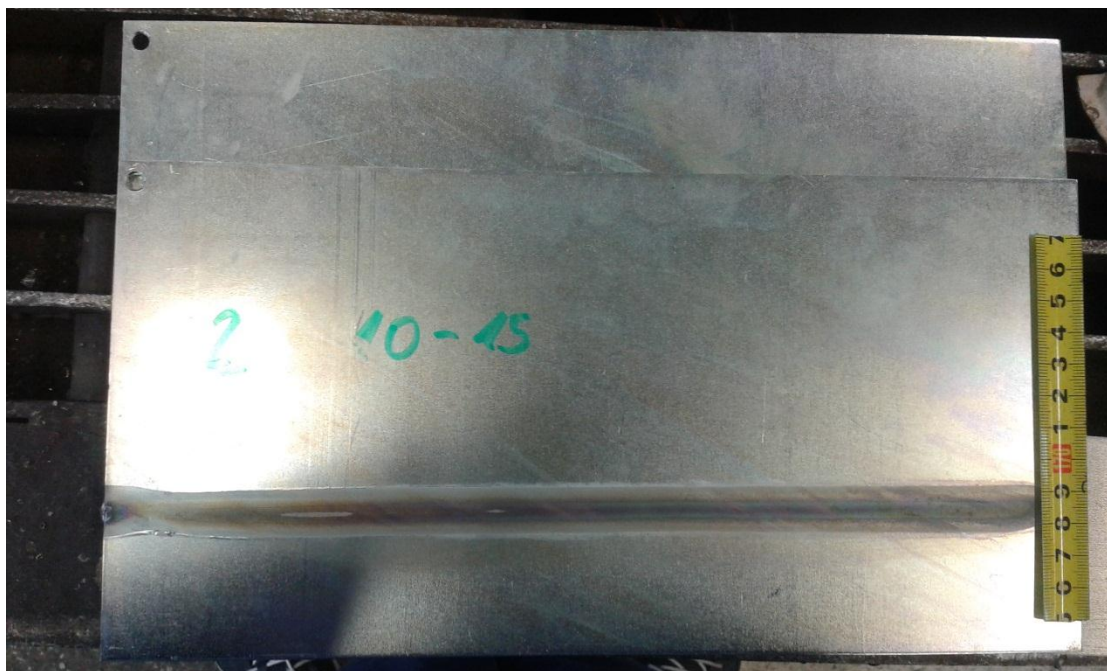
Na slici 27 prikazano je lice spoja, a na slici 28 naličje uzorka broj 2.



**Slika 27. Uzorak 2 - lice**



Kvaliteta lema spoja je loša. Došlo je do većeg prskanja, nego na uzorku 1. Prisutno je puno pora. Širina pora se kreće do 3 mm. Prisutnost pora, znači da je došlo do isparavanja cinka u samom lemu. Širina ogorine kreće se do 4 mm. Očito je da idealni parametri određeni za uzorke sa debljinom sloja cinka između 5  $\mu\text{m}$  i 8  $\mu\text{m}$  ne odgovaraju za ovaj uzorak.



Slika 28. Uzorak 2 - naličje

Izgled naličja je poprilično dobar. Duž lema vidljive su promjene boje na sloju cinka u širini od 14 mm, ali nije došlo do protaljivanja.

Uzorak 3 je imao debljinu zaštitnog sloja cinka između 15  $\mu\text{m}$  i 20  $\mu\text{m}$ . Rezultati su prikazani u tablici 8.

**Tablica 8. Parametri lemljenja limovimova sa slojem debljine cinka između 15  $\mu\text{m}$  i 20  $\mu\text{m}$  – Uzorak 3**

Parametri	Jakost struje, [A]	Napon, [V]
Početni	130	16
Tijekom lemljenja	146	16,5

Kao i u prethodnim primjerima i ovdje je došlo do porasta jakosti struje i napona. Jakost struje porasla je za 16 A, a napon za 0,5 V.

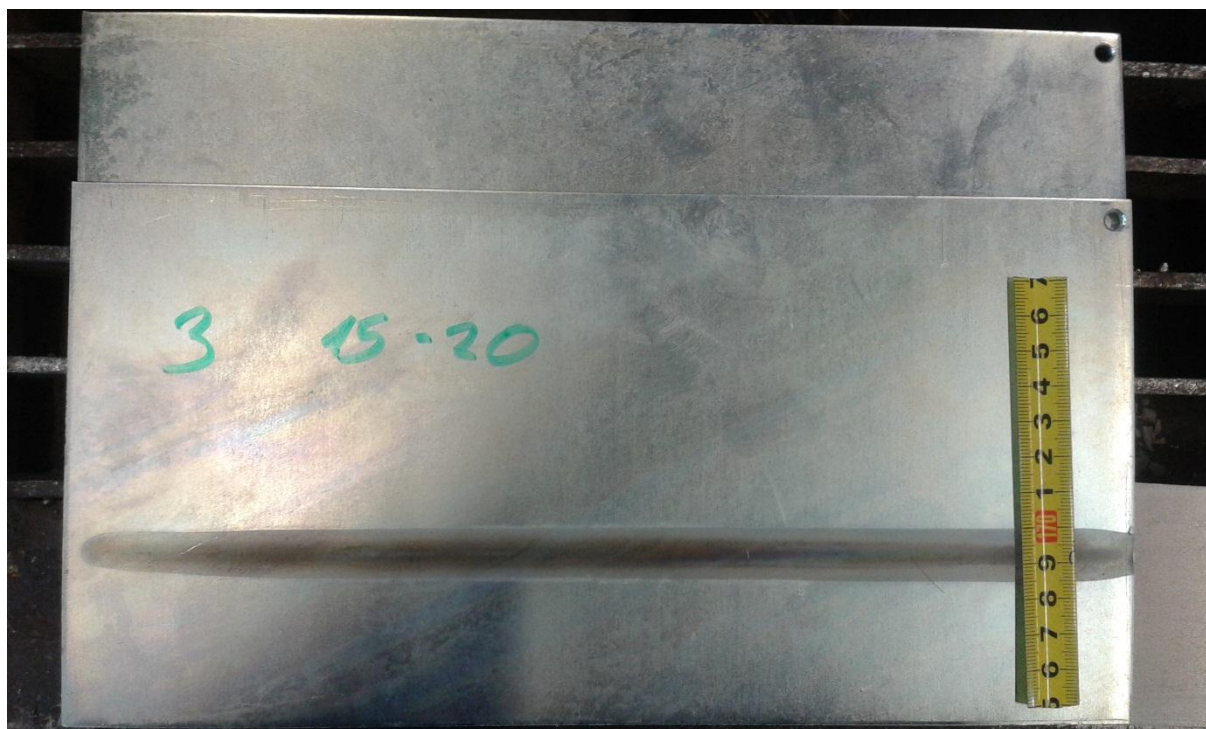


Na slici 29 prikazano je lice spoja, a na slici 30 naličje uzorka broj 3.



**Slika 29.      Uzorak 3 - lice**

Pri lemljenju došlo je do prskanja, ali u manjim količinama nego kod uzorka 2. Također, prisutne su i pore, ali isto u manjoj količini. Širina lema je 8,5 mm, a širina ogorine kreće se do 4,5 mm.



**Slika 30.      Uzorak 3 - naličje**

Izgled naličja je dobar, nije došlo do protaljivanja i izgaranja sloja cinka. Širina obojenja je 14 mm.

Na temelju rezultata eksperimenta zaključuje se da parametri koji su optimalni za uzorak 1 s debljinom zaštitnog sloja cinka između 5  $\mu\text{m}$  i 8  $\mu\text{m}$  nisu optimalni za uzorke 2 (10  $\mu\text{m}$  ... 15  $\mu\text{m}$ ) i 3 (15  $\mu\text{m}$  ... 20  $\mu\text{m}$ ). Kod debljih slojeva cinka potrebno je smanjiti brzinu zavarivanja kako bi se dalo više vremena cinku da ispari. Prema literaturi postotak smanjivanja brzine zavarivanja kreće se između 10 % i 20 %. Druga mogućnost je povećati struju zavarivanja, ali budući da je ovdje riječ o tvrdom lemljenju, kod koga elektrode imaju niže talište, povećanjem struje postoji opasnost od izlaska iz područja kratkih spjeva.

## 5. ZAKLJUČAK

Potreba za zavarivanjem pocinčanih predmeta sve je veća iz razloga što su današnje konstrukcije sve lakše, a samim time i manjeg poprečnog presjeka pa zaštita od korozije mora biti sve kvalitetnija, a vrlo često ta zaštita izvodi se pocinčavanjem. Područje primjene pocinčanih proizvoda je široko: oprema za ceste, rasvjetni stupovi, armature za betoniranje, automobilska i brodograđevna industrija, pomorska oprema, željeznica, elektroprivreda, poljoprivredne konstrukcije, razne ograde, čelično rešetkaste konstrukcije, komunalna oprema za javne gradske površine, metalne cijevi razne namjene te gotovo svi ostali čelični proizvodi izloženi atmosferskim utjecajima. [3]

Debljina nanesenog sloja cinka ovisi od postupka do postupka, kreće se od nekoliko mikrometara pa do nekoliko desetaka mikrometra (6...100  $\mu\text{m}$ ) a moguće su i veće debljine slojeva.

Sam postupak zavarivanja, odnosno lemljenja, nešto je složeniji nego postupak zavarivanja nepocinčanih obradaka. Problem pri zavarivanju stvara tanki sloj cinka iz razloga što su mu temperature tališta i vrelišta dosta niže od temperature tališta čelika. Također, potrebno je obratiti pažnju na cinkove pare, koje se spajaju s kisikom i tvore cinkov oksid koji može štetno utjecati na ljudsko zdravlje. Zbog visokih temperatura sloj cinka u blizina zavara isparava i ostavlja nezaštićeno područje. Iako preostali cink pruža određenu zaštitu, pri atmosferskim utjecajima ta zaštita neće biti dovoljna i doći će do korozije. Za obnavljanje zaštitnog sloja preporučuju se zaštitni premazi na bazi cinka.

Za zavarivanje pocinčanih limova koriste se brojni postupci, kao npr. MIG/MAG, EO točkasto, lasersko zavarivanje, ali s time da je potrebno provesti određene korekcije u postupku zavarivanja s ciljem postizanja zadovoljavajuće kvalitete zavara. Zaostale cinkove pare u zavaru mogu izazvati pukotine i pore pa je većina korekcija provedenih na postupcima zavarivanja koncentrirana na rješavanje tog problema.

U eksperimentalnom dijelu rada odabran je postupak zavarivanja i zaštitni plin. Odabrani postupak je MIG lemljenje, a zaštitni plin je argon. Određeni su optimalni parametri lemljenja za uzorak s debljinom zaštitnog sloja između 5  $\mu\text{m}$  i 8  $\mu\text{m}$ . Ti parametri korišteni su i pri lemljenju limova s većim debljinama zaštitnog sloja cinka. Debljina sloja cinka uzorka 2 bila je između 10  $\mu\text{m}$  i 15  $\mu\text{m}$ , a debljina sloja cinka na uzorku 3 između 15  $\mu\text{m}$  i 20  $\mu\text{m}$ . Parametri koji su bili optimalni za uzorak s najtanjim slojem cinka nisu se pokazali prikladnima za uzorke s debljim slojem cinka. Na uzorcima s debljim slojem cinka došlo je do povećanog prskanja i pojavljivanja velikog broja pora.

Pri definiranju tehnologije zavarivanja pocinčanih limova potrebno je voditi računa o debljini pocinčanog sloja, a ne samo o debljini osnovnog materijala, jer je iz eksperimenta vidljivo da debljina pocinčanog sloja različito utječe na kvalitetu zavarenog spoja. Optimalni parametri određeni za jednu debljinu zaštitnog sloja cinka ne moraju biti optimalni za neku drugu debljinu sloja cinka. Stoga, određivanju tehnologije zavarivanja treba pristupiti s oprezom.

---

**LITERATURA**

- [1] <http://www.galvanizingasia.com/pdfs/ZincCoatingProtectingSteel.pdf>,  
dostupno:20.8.2015.
- [2] Ivan Juraga, Vinko Šimunović, Vesna Alar: Autorizirana predavanja: Korozija i zaštita, FSB, 2013.
- [3] Goran Tumara, Zaštita pocinčanih čeličnih konstrukcija vodorazrijedivim premazima, FSB, 2009.
- [4] <http://hr.kompass.com/c/galvanizacija-lovric-obrt-za-galvanizaciju/hr341944/>,  
dostupno: 20.8.2015.
- [5] <http://education.gtgj.org.uk/en/blowup1/307>, dostupno 20.8.2015
- [6] <http://www.sperkoengineering.com/html/articles/WeldingGalvanized.pdf>, dostupno:  
20.8. 2015.
- [7] Vladimir Panjković ,MIG lemljenje pocinčanih limova, Završni rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [8] Junjie Ma, Fanrong Kong, Blair Carlson and Radovan Kovacevic, Mitigating Zinc Vapor Induced Weld Defects in Laser Welding of Galvanized High-Strength Steel by Using Different Supplementary Means, SAD
- [9] K.Weman:“Welding processes handbook“ Cambridge 2003.
- [10] <http://www.millerwelds.com/products/mig/onephase.php>, dostupno: 22.8.2015.
- [11] <http://www.gaa.com.au/index.php?page=welding>, dostupno: 19.8.2015.
- [12] <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELOTP.pdf>, dostupno:23.8.2015.
- [13] [http://www.rsfinishing.com/downloads/pdf/downloads\\_page/ZINC-COATED-STEELS.pdf](http://www.rsfinishing.com/downloads/pdf/downloads_page/ZINC-COATED-STEELS.pdf), dostupno:25.8.2015.
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=I47XtXCeptE>, dostupno: 26.8.2015.
- [15] Marko Horvat, Veljko Kondić, Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Technical journal, 2012.
- [16] Knopp N., Killing R., Arc Brazing – Innovative safe and economical, Ewm Hightech Welding GmbH, Germany, 2003
- [17] American Welding Society,: Brazing Handbook, LeJeune Road, Miami, 1991.
- [18] S. Kralj, Š. Andrić; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Zagreb, 1992.